



**2013**

**ESCOLA SUPERIOR AGRÁRIA DE PONTE DE LIMA  
INSTITUTO POLITÉCNICO DE VIANA DO CASTELO**

**ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM POVOAMENTOS DE PINHEIRO  
BRAVO RECORRENDO A INVENTÁRIO FLORESTAL, DETEÇÃO REMOTA E  
SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA**

**TESE DE MESTRADO  
GESTÃO AMBIENTAL E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO**

**ROGÉRIO JORGE SILVA DE QUEIRÓS**

**PONTE DE LIMA , 2013**



As doutrinas expressas neste trabalho são da exclusiva responsabilidade do autor.



## ÍNDICE GERAL

Resumo .....	vii
Abstract .....	ix
Agradecimentos .....	xi
Lista de tabelas .....	xvii
Lista de figuras .....	xix
1. Introdução .....	1
1.1 Métodos diretos para determinar o IAF .....	5
1.1.1 Métodos de colheita e não colheita .....	5
1.1.2 Técnicas de determinação da área foliar .....	6
1.2 Métodos indiretos para determinar o iaf .....	8
1.2.1 Métodos dos quadrats pontuais inclinados .....	8
1.2.2 Métodos baseados na análise da fração de “espaços vazios” do copado .....	9
1.2.3 O modelo de Beer-Lambert .....	10
1.2.4 Métodos alométricos .....	13
2. Os sistemas de informação geográfica e a detecção remota .....	17
2.1 Os sistemas de informação geográfica .....	17
2.2 Componentes de um SIG .....	19
3. Produtos de detecção remota .....	21
3.1 Satélite Terra / Sensor MODIS .....	23
3.2 Programa Landsat .....	28
3.3 Produtos de IAF disponíveis a nível global .....	31
3.3.1 AVRH (Advanced Very High Resolution Radiometer) .....	31
3.3.2 SPOT Vegetation .....	32
4. Índices de vegetação .....	35

4.1 NDVI .....	36
4.2 EVI .....	37
4.3 EVI 2 .....	37
5. Material e métodos .....	39
5.1 Localização da área de estudo .....	39
5.2 Recolha das variáveis dendrométricas.....	41
5.3 Medições indiretas do IAF com o céptómetro.....	41
5.4 Procedimentos de Detecção Remota .....	42
5.4.1 Aquisição e preparação das imagens de satélite.....	42
5.4.2 Gap Filling (correção de falhas) das imagens Landsat 7 ETM+ .....	43
5.4.3 Processamento da imagem de satélite e criação de Índices de vegetação .....	44
5.5 Ajustamento e validação dos modelos de regressão.....	47
6. Resultados e discussão .....	51
6.1 Características dos povoamentos de pinheir-bravo .....	51
6.2 Correlação entre o IAF As variáveis dos povoamentos e as características espectrais .....	51
6.3 Estabelecimento das equações de regressão.....	54
6.4 Comparação entre o IAF e Equações propostas por outros autores .....	61
6.5 Comparação entre o IAF e o IAF DAS imagens MODIS .....	63
7. Conclusão e perspectivas futuras.....	65
8. Referências bibliográficas .....	67

## RESUMO

A presente tese pretende avaliar a aplicabilidade da detecção remota, sistemas de informação geográfica e inventário florestal na determinação do índice de área foliar em povoamentos de pinheiro bravo. O estudo decorreu na região do Minho Lima, onde se instalaram 35 parcelas de inventário circulares, com  $500\text{m}^2$ , para se recolherem as variáveis dendrométricas dos povoamentos e medir o Índice de área foliar (IAF), com ceptómetro. Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 7 ETM+ e do satélite Terra/MODIS de forma a explorar as características espectrais registadas por estes sensores (bandas individuais e índices de vegetação), para a determinação indireta do IAF. As coordenadas das parcelas, levantadas por sistema de posicionamento global, juntamente com as imagens de satélite, foram introduzidas num sistema de informação geográfica (SIG), onde se fizeram os processamentos de detecção remota e análise SIG, necessários. Foram ajustados vários modelos de regressão, pelo método dos mínimos quadrados, para estimativa do IAF, tendo como variáveis independentes os parâmetros dendrométricos e as variáveis espectrais extraídas das imagens de satélite. Foram ainda estabelecidas equações para estimativa da área basal (G), do volume comercial (V) e da biomassa total (Bt), tendo como variável independente o IAF. As estatísticas do ajustamento mostraram uma moderada a boa qualidade de ajustamento para a estimação do IAF a partir das variáveis do povoamento: G ( $R^2_{aj}=0.685$ ,  $s_{yx}=15.7\%$ ), V ( $R^2_{aj}=0.635$ ,  $s_{yx}=15.7\%$ ), Bt ( $R^2_{aj}=0.637$ ,  $s_{yx}=15.7\%$ ), utilizadas individualmente, e Acp (área da copa) e N (número de árvores por hectare), combinadas ( $R^2_{aj}=0.870$ ,  $s_{yx}=9.4\%$ ). As equações ajustadas para estimativa de G, V e Bt apresentam uma capacidade preditiva similar, a partir do IAF ( $R^2_{aj}=0.685$ ,  $s_{yx}=23.5\%$ ;  $R^2_{aj}=0.635$ ,  $s_{yx}=25.9\%$ ; e  $R^2_{aj}=0.637$ ,  $s_{yx}=24.7\%$ ; respetivamente). As correlações observadas entre o IAF e a informação espectral extraída das imagens ETM+ foram pouco significativas e nas imagens MODIS não se observou qualquer correlação, pelo que não se estabeleceram equações para determinação do IAF com estas variáveis independentes. A comparação dos modelos desenvolvidas neste trabalho, com equações estabelecidas por outros autores, para estimativa do IAF em povoamentos de pinheiro bravo, confirmaram a boa capacidade preditiva, e o desajustamento em aplicar, nesta região, alguns modelos ajustados para outros locais. Por fim, as estimativas produzidas pelos modelos desenvolvidos foram comparadas com os produtos MOD15A2, que apresentam o

mapeamento do Índice de Área Foliar global, a uma resolução de 1km x 1Km, mostrando que estes produtos não têm utilidade para estudos à escala local, com uma paisagem muito estratificada e dispersa em diferentes coberturas do solo, como é o caso da nossa área de estudo.

**Palavras-Chaves:** *Índice de Área foliar, Detecção Remota, SIG, pinheiro-bravo, índices de vegetação, região Minho-Lima.*



## ABSTRACT

This thesis aims to evaluate the applicability of remote sensing, geographic information systems and forest inventory in determining the leaf area index (LAI) in stands of pine. The study took place in the region of Minho Lima, where 35 circular inventory plots of 500m<sup>2</sup> were settled, to collect the dendrometric variables of the stands and measure the leaf area index, with a ceptometer. The images used were taken by Landsat 7 ETM+ and Terra satellite with MODIS in order to explore the spectral characteristics recorded by these sensors (individual bands and vegetation indices) for the indirect determination of the LAI. The coordinates of the plots, raised by global positioning system, along with the satellite images, were entered into a geographic information system (GIS), which made the required processing of remote sensing and GIS analysis. Multiple regression models were adjusted by the method of least squares to estimate LAI, as independent variables dendrometric parameters and spectral variables extracted from satellite images. Equations were established to estimate the basal area (G), the trade volume (V) and biomass (Bt), the independent variable LAI. Statistical adjustment showed a moderate to good quality adjustment for the estimation of LAI from stand variables: G ( $R^2_{aj} = 0.685$ ,  $syx = 15.7\%$ ), V ( $R^2_{aj} = 0.635$ ,  $syx = 15.7\%$ ), Bt ( $R^2_{aj} = 0.637$ ,  $syx = 15.7\%$ ), used individually, and Acp (crown area) and N (number of trees per hectare), combined ( $R^2_{aj} = 0.870$ ,  $syx = 9.4\%$ ). The adjusted equations to estimate G, V and Bt have a similar predictive ability, from the IAF ( $R^2_{aj} = 0.685$ ,  $syx = 23.5\%$ ;  $R^2_{aj} = 0.635$ ,  $syx = 25.9\%$  and  $R^2_{aj} = 0.637$ ,  $syx = 24.7\%$ ; respectively). The correlations observed between LAI and the spectral information extracted from ETM+ images were negligible and the MODIS did not observe any correlation, so there is no set equation to determine the LAI with these independent variables. The comparison of the models developed in this work with equations established by other authors to estimate LAI in stands of pine, confirmed the good predictive ability, and maladjustment in applying, in this region, some models suitable for other locations. Finally, the estimates produced by the developed models were compared with MOD15A2 products, which show the Leaf Area Index map globally, at a resolution of 1km x 1km, showing that these products are not useful for studies at local level, with a very stratified and scattered landscape in different soil coverage, as it is the case of our study area.

**Key Words:** leaf area index, Remote sensing, GIS, maritime pine, vegetation indices, Minho-Lima region.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Doutor Hélder Filipe dos Santos Viana, expresso o meu profundo agradecimento pela orientação e apoio incondicional que muito elevaram os meus conhecimentos científicos e, sem dúvida, muito estimularam o meu desejo de querer, sempre, saber mais e a vontade constante de querer fazer melhor. Agradeço também a sua amizade e total disponibilidade.

Ao professor Joaquim Mamede Alonso o meu sincero agradecimento pela co-orientação neste Projeto. Muito obrigada pelo profissionalismo, pela sincera amizade e pela total disponibilidade que sempre revelou para comigo.

Ao Coordenador do curso de Mestrado, Professor Doutor Miguel Brito, pela atenção dispensada e pela sua constante disponibilidade.

À Ivone Martins, Cláudio Paredes e Carlos Guerra pelo apoio na identificação das parcelas e execução de alguma cartografia.

Agradeço a todos os professores e colegas de turma, pois sem o conhecimento e empenho de todos, o tempo que passamos juntos não seria tao enriquecedor.

À Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro e à Escola Superior Agrária de Ponte de Lima pelos meios disponibilizados.

Aos meus Pais e Irmãos e à Dália, minha companheira em todas as “guerras”.

A todos quantos, direta ou indiretamente me apoiaram tornando possível a realização deste trabalho.



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS**

AB - Área do Borne

ALI - Advanced Land Imager

ALT - Altura

AMA - Acréscimo Médio Anual

ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

AVRH - Advanced Very High Resolution Radiometer

Bt - Biomassa Aérea Total

CERES - Clouds and the Earth's Radiant Energy System

DAP - Diâmetro à Altura do Peito

DBC - Diâmetro da Base da Copa

dcopa - Diâmetro Médio das Copas

ddom - Diâmetro Dominante

DED T - Doise Equivalente Temperature Difference

DR - Detecção Remota

EMA - Erro Médio Absoluto

EMA% - Erro Médio Absoluto

EO-1 - Earth Observer-1

EOS - Earth Observing System

EQM - Erro Quadrático Médio

ERTS-1 - Earth Resources Technology Satellite 1

ESAPL - Escola Superior Agrária de Ponte de Lima

ESSE - Earth Science Enterprise

ETM+ - Enhanced Thematic Mapper plus

EVI - Enhanced Vegetation Index

FI - Índice de Furnival

FPAR - Fração da Radiação Absorvida pela Vegetação Fotossinteticamente Ativa

FW - Fator de Espaçamento de Wilson

G - Área Basal

GC - Percentagem de Cobertura do Solo

GC% - Grau de Cobertura do Solo

GPS - Global Positioning System

hcp - Altura da Copa

HDF - Hierarchical Data Format

hdom - Altura Dominante

ht - Altura Total

IAF - Índice de Área Foliar

IQ - Índice de Qualidade

IV - Índices de Vegetação

LAC - Atmospheric Corrector

LEISA - Linear Etalon Imaging Spectrometer Array

LIS - Sistema de Informação da Terra

MFA - Massa Foliar por Área

MISR - Multi-angle Imaging SpectroRadiometer

MODIS - Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

MOPITT - Measurements Of Pollution In The Troposphere

MRT - Modis Reprojection Tool

MSS - Multispectral Scanner Subsystem

N/ha - Número de árvores por hectare

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NDVI - Índice da Diferença Normalizada

NMP - New Millennium Program

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

OLI - Operational Land Imager

PPB - Produção Primária Bruta

PPL - Produção Primária Líquida

$R^2$  - Coeficiente de Determinação

$R^2_{aj}$  - Coeficiente de Determinação Ajustado

RBV - Return Beam Vidicon

REM - Radiação Eletromagnética

SAVI - Índice de Vegetação do Solo Ajustada

SFD - Sistemas de Fotogrametria Digital

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

SIGI - Sistema de Informação Geográfica Integrado

SLC - Scan Line Corrector

SNR - Signal to Noise Ratio

SPOT - Satellite Pour l'Observation de la Terre

SSR - Sistemas de Sensoriamento Remoto

syx - Desvio Padrão dos Resíduos

t - Idade do Povoamento

TIRS - Thermal InfraRed Sensor

TM - Thematic Mapper

UTM - Universal Transversa de Mercator

V - Volume comercial





## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Comparação de várias definições de IAF .....	2
Tabela 1.2 - Exemplos de valores de K e de aparelhos para a avaliação da transmitância (ou da fração de espaços vazios) utilizados em avaliações do índice de área foliar a partir do modelo de Beer-Lambert. ....	12
Tabela 1.3 - Exemplo de modelos alométricos para estimar a área foliar das árvores individuais. ....	15
Tabela 3.1 - Especificações Técnicas do Sensor MODIS. ....	24
Tabela 3.2 - Especificações das Bandas 1 a19 do Sensor MODIS.....	25
Tabela 3.3 - Especificações das Bandas 20 a 36 do Sensor MODIS.....	26
Tabela 3.4 – Características do satélite Landsat 8 (B1 à B9).....	30
Tabela 3.5 - Características do satélite Landsat 8 (B10 e B11).....	30
Tabela 3.6 – Características do sensor AVHRR.....	31
Tabela 3.7 – Características do sensor VEGETATION .....	32
Tabela 3.8 – Radiometria do sensor VEGETATION.....	33
Tabela 6.1 - Estatísticas descritivas das características estruturais dos povoamentos de pinheiro bravo.....	51
Tabela 6.2 - Correlação entre o IAF e as variáveis estruturais dos povoamentos de pinheiro bravo.....	52
Tabela 6.3 - Correlação entre o IAF e a informação espectral extraída nas imagens MODIS e Landsat 7 ETM+ .....	52
Tabela 6.4 - Estatísticas do ajustamento das equações para estimar o IAF.....	54
Tabela 6.5 - Equações ajustadas para estimar G, V e Bt e estatísticas do ajustamento..	58
Tabela 6.6 - Estatísticas do ajustamento das equações para estimar o IAF.....	62



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquema da interação da radiação solar com o copado descrito pelo modelo de Beer-Lambert.....	11
Figura 2.1 - Funcionalidades de um SIG.....	19
Figura 3.1 - Componentes de um sistema de detecção remota .....	22
Figura 3.2 – Programa Landsat.....	28
Figura 5.1 - Localização da área de estudo com as parcelas de amostragem.....	39
Figura 5.2 - Produto MODIS selecionado para o estudo.....	42
Figura 5.3 - Índice de vegetação normalizada (NDVI) do sensor MODIS .....	45
Figura 5.4 - Enhanced Vegetation Index (EVI) do sensor MODIS.....	45
Figura 5.5 - Índice de vegetação normalizada (NDVI) do sensor ETM+ .....	46
Figura 5.6 - Novo Enhanced Vegetation Index (EVI2) do sensor ETM+ .....	46
Figura 6.1 - Gráfico de dispersão dos valores de IAF em função da área basal (G) .....	55
Figura 6.2 - Gráfico de dispersão dos valores de IAF em função do volume (V).....	55
Figura 6.3 - Gráfico de dispersão dos valores de IAF em função da biomassa aérea total (G).....	56
Figura 6.4 - Gráfico de dispersão dos valores de IAF em função da variável combinada, área da copa e número de árvores por hectare.....	56
Figura 6.5 - Gráfico de dispersão entre os valores de IAF observados e estimados .....	57
Figura 6.6 - Gráfico de dispersão dos valores da área basal (G) em função do IAF.....	58
Figura 6.7 - Gráfico de dispersão dos valores do volume (G) em função do IAF .....	59
Figura 6.8 - Gráfico de dispersão dos valores da Biomassa aérea total em função do IAF .....	59
Figura 6.9 - Gráfico de dispersão entre os valores observados e estimados .....	60
Figura 6.10 - Comparação de dispersão entre o IAF observados e estimados por equações de outros autores .....	61

Figura 6.11 - Comparação de dispersão entre o IAF observados e estimados pelas equações desenvolvidas e o modelo de Porté <i>et al.</i> , 2000.....	62
Figura 6.12 - Índice de Área Foliar MODIS, com sobreposição das parcelas de amostragem.....	63
Figura 6.13 - IAF de referência comparado com o IAF das imagens MODIS.....	64

## 1. INTRODUÇÃO

A floresta desempenha um importante papel na economia mundial, sendo o conhecimento dos recursos florestais o objetivo principal para a grande maioria dos países. Sendo a floresta gerida para uma grande complexidade de objetivos a recolha de informação constitui uma tarefa complexa.

Analizando a potencialidade de utilização das imagens de satélite na estimação das principais variáveis dendrométricas, procura-se efetuar uma reflexão sobre as perspectivas futuras da sua utilização na avaliação do índice de área foliar (IAF- LAI do inglês).

O índice de área foliar representa o valor resultante do quociente entre a soma da área das folhas (considerando-se apenas uma das faces) e a área de terreno sobre a qual esta se projeta, sendo portanto uma quantidade adimensional (Watson, 1947). Para o caso das árvores de folha larga com folhas planas, esta definição pode ser utilizada, porque ambos os lados de uma folha têm a mesma área de superfície. No entanto, se os elementos da folhagem não são planas, mas amassado, dobrado ou enrolado, a área de um lado não está claramente definida. O mesmo problema existe para árvores coníferas, em que as agulhas podem ser cilíndricas ou hemi-cilíndricas (Chen and Black, 1992). A fim de ter em conta a forma irregular das agulhas e folhas, alguns autores propuseram uma área projetada da folha (Smith *et al.*, 1991), sendo que neste caso, a escolha do ângulo de projeção é decisivo, e uma projeção vertical não resulta forçosamente em valores mais elevados. Logo, Myneni *et al.* (2002) define o IAF como a área foliar máxima projetada por unidade de área da superfície do solo. O raciocínio que suporta o abandono do conceito de projeção era de que este último não tem significado nem físico nem biológico, enquanto a área total interceptada tem um significado físico (interceção da radiação) e a área total possui uma conexão biológica (troca gasosa).

Foram ainda propostas outras definições e interpretações de IAF, como mostra a tabela 1.1. Estes conceitos variam dependendo da técnica utilizada para a sua determinação.

Tabela 1.1 – Comparação de várias definições de IAF

<b>Tipo</b>	<b>Definição</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Referências</b>
<b>Total Leaf Area Index (ToLAI)</b>	Área simples total de tecido fotossintético por unidade de área de superfície de terra.	Aplicado a folhas largas.	(Watson, 1947; Myneni <i>et al.</i> , 2002)
<b>Projected Leaf Area Index (PLAI)</b>	A área de sombra horizontal que é moldada abaixo de uma folha horizontal de uma luz na distância infinita diretamente acima dela.	Área máxima de folhas da vista orbital aérea - varia dependendo do ângulo do zenit do sensor.	(Ross, 1981; Myneni <i>et al.</i> , 2002) ;
<b>Silhouette Leaf Area Index (SLAI)</b>	A área de folhas inclinadas à superfície horizontal.	Investiga a interceção da radiação para formas diferentes das folhas.	(Smith <i>et al.</i> , 1991)
<b>Effective Leaf Area Index (ELAI)</b>	Um meio da área total de luz intercetada pelas folhas por unidade de área de superfície de terra horizontal - suponha que a distribuição espacial da folha é aleatória.	Descreve precisamente o regime de interceção da radiação e da radiação dentro e sob o copado.	(Chen and Black, 1992)
<b>True Leaf Area Index (TLAI)</b>	Metade da área total das folhas verdes por unidade de área de superfície de terra horizontal.	Caraterização quantitativa o regime da radiação dentro e sob o copado, e simula o processo ecológico da folha.	(Lang, 1991; Chen and Black, 1992)

Fonte: adaptado de Zheng and Moskal (2009)

A definição mais popular e mais aceite é a do verdadeiro índice de área foliar (TLAI), definida como metade da área total das folhas por unidade de superfície.

Podemos afirmar que o IAF da vegetação depende de composição de espécies, do estado de desenvolvimento, e da sazonalidade, sendo também fortemente dependente das condições do local predominantes e das práticas de gestão.

A soma destes fatores, articulados com a diferença dos métodos de avaliação pode conduzir a uma grande variação dos valores de IAF. Estudos publicados mostram valores de IAF de 0,40 para *Quercus petraea* (Matus) Liebl e 14 para *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. Em geral, os valores mais elevados, relatadas, são para copas

específicas de coníferas. Schulze (1982) relatou que o IAF para a maioria dos biomas (aparte do deserto e da tundra) variou entre 3 a 19, os maiores valores reportados para a floresta boreal de coníferas. Ocasionalmente, valores superiores de IAF de 41,8 foram publicados. Contudo, estes valores podem resultar de simplificações inadequadas no método de medição.

Para quantificar a fotossíntese, processos de evapotranspiração, emissões gasosas do copado ou a queda da folhagem é essencial o conhecimento do IAF (Running *et al.*, 1986). Vários autores identificaram boas relações entre o IAF e a produtividade primária líquida (PPL), o acréscimo de volume e mostraram a utilização do IAF para prever o crescimento florestal e para compreender melhor toda a estrutura e funcionamento dos ecossistemas florestais.

Os métodos para avaliação das características estruturais de vegetação são geralmente agrupados em duas categorias genéricas: diretos e indiretos (Wang *et al.*, 2005). Nos métodos diretos, são feitas medições de áreas, ângulos, forma ou posição e são efetuadas manual e diretamente sobre os elementos das plantas (folhas, troncos, ramos, flores e frutos), para determinar os parâmetros caracterizadores de estrutura do copado. Estes tipos de medições implicam geralmente alterações, ou mesmo destruição, da própria estrutura da copa sendo, por isso, considerados como métodos destrutivos. Na aplicação dos métodos diretos têm sido sugeridas duas técnicas de amostragem (Bréda, 2003): o método dos cortes estratificado e o método das plantas individuais dispersas. O primeiro está orientado para situações em que a densidade de plantas é muito elevada, tornando difícil o seu estudo individualmente (ex: pastagens e searas). Nestes casos, é definido um volume representativo de vegetação, que se divide em estratos onde, então, se fazem as medições necessárias. O segundo método é indicado para formações vegetais em que a densidade de plantas é baixa (caso do pinheiro-bravo), o que permite que as plantas possam ser estudadas separadamente. O método consiste em selecionar um número reduzido de plantas, representativas do coberto vegetal, nas quais se realizam as medições necessárias. As medições podem também ser feitas segundo estratos, verticais ou de acordo com a distância ao eixo da planta.

Para se avaliar a área foliar da cada planta, ou de um dado volume de vegetação, para o caso de aplicação do método dos cortes estratificados, é necessário remover todas as folhas da planta, ou, então, proceder a uma amostragem.

A área foliar pode ser medida em todas as folhas (da planta ou da amostra), ou estimada a partir do valor do peso seco das folhas, desde que se conheça a área foliar específica respectiva. A área foliar específica (área foliar por unidade de peso seco de folhas) é avaliada a partir de uma amostra de folhas em que se determina a área foliar e o peso seco correspondente. A medição da área foliar pode ser feita por diversos métodos, nomeadamente utilizando um medidor digital de áreas, ou utilizando processos de amostragem, assumindo que as folhas podem ser aproximadas a uma determinada figura geométrica. O IAF é calculado dividindo a área foliar das plantas, considerando-se uma só página, pela área de terreno coberto por estas.

A avaliação do IAF por aplicação de métodos diretos, embora potencialmente rigorosa, apresenta, no entanto, várias limitações, sendo talvez a principal a necessidade de destruição da vegetação. Por outro lado, os métodos diretos são bastante laboriosos, exigindo muito tempo para a sua execução. Estas características tornam estes métodos impraticáveis para uso sistemático em grandes áreas, sendo geralmente utilizadas para aferição de métodos indiretos. Como referem Wang *et al.* (2005), as vantagens dos métodos indiretos são tão evidentes que os métodos diretos só terão aplicabilidade prática quando não existir uma alternativa indireta.

Os métodos indiretos caracterizam-se por recorrerem à medição de uma variável que se encontra relacionada com a variável em estudo e que apresenta maior facilidade de medição. A relação entre a variável medida e a de estudo é conseguida através do estabelecimento de um modelo, construído geralmente a partir de uma amostra em que se procede à medição das variáveis empregando métodos diretos.

Os diferentes métodos indiretos diferenciam-se essencialmente por três aspetos:

- pelas variáveis que são utilizadas para inferir as características da copa;
- pelo método utilizado para fazer a avaliação dessa variável;
- pelo modelo que descreve a relação entre as variáveis.

Presentemente, as medições de radiação obtidas remotamente por sensores óticos instalados em satélites (por ex: TM, MSS, AVHRR, HRV), ou em aviões (por ex: Daedalus ATM, AVIRIS, CASI), constituem um meio com bastantes potencialidades para avaliar o IAF de grandes áreas de vegetação. As imagens sintetizadas por estes sensores possibilitam uma visão sinótica da superfície terrestre, mas, para além disso, fornecem uma medida física das propriedades de refletância das superfícies, obtida sob



a forma de uma matriz, que pode ser repetida em intervalos de tempo mais ou menos frequentes (Colditz *et al.*, 2007).

A informação radiométrica espectral, após um processamento adequado em que se atende aos vários fenómenos físicos que lhe deram origem, pode ser utilizada para inferir características das superfícies observadas e assim gerar “mapas” de parâmetros da vegetação para uma determinada região e momento no tempo. A utilização da detecção remota para fins quantitativos está no entanto ainda depende do levantamento de dados de campo para que se possa estabelecer uma correlação entre os dados espectrais e os parâmetros da vegetação em estudo.

## **1.1 MÉTODOS DIRETOS PARA DETERMINAR O IAF**

Os métodos diretos são os mais precisos, mas têm a desvantagem de ser extremamente demorada e, como consequência tornar a aplicação em larga escala pouco viável. Torna-se ainda mais complicado a aplicação em povoamentos adultos e de difícil acesso.

### **1.1.1 Métodos de colheita e não colheita**

O IAF pode ser avaliado diretamente usando os métodos de colheita, tais como, amostragem destrutiva e método da árvore modelo, ou por não colheita, colhendo durante o período de outono (queda das folhas) nas florestas caducifólias. Como a área foliar é determinada através de medições de área, repetido em folhas individuais e de acumulação de área, esses métodos são, portanto, considerados os precisos (Chen and Black, 1992), e por essa razão são frequentemente implementados como ferramentas de calibração para as técnicas de medição indiretas.

A amostragem destrutiva de uma parte do povoamento envolve a extrapolação e, pelo menos, a suposição de homogeneidade do mesmo. Esta suposição é melhor aferida em povoamentos jovens, distribuídos por áreas relativamente grandes, sob condições homogêneas, como por exemplo as plantações de coníferas jovens.

O método da árvore modelo consiste na amostragem destrutiva de uma pequena quantidade de árvores, representativas para fora do povoamento, a partir do qual a área foliar e distribuição vertical de área foliar é medida folha a folha. Num povoamento com a mesma idade, que tem muitas vezes uma distribuição normal, a amostragem de 3 ou 5 árvores pode ser suficiente. O método tem sido largamente utilizado na avaliação

de culturas agrícolas e sistemas florestais onde, para a extrapolação, são utilizados métodos alométricos.

Os métodos de não colheita consistem em colher as folhas, durante o período de queda, usando coletores. Armadilhas de um tamanho pré-determinado são colocadas em qualquer posição, de modo que uma maior frequência de armadilhas irá resultar numa maior precisão como o efeito de aumento de escala. Sob os regimes adequados de amostragem espacial e temporal, os coletores têm sido muito úteis em florestas decíduas.

A configuração é bastante simples mas não é, no entanto, aplicável às florestas verdes, onde a queda da folha anual não está diretamente relacionada ao acréscimo de biomassa anual, mas para o tempo de vida médio de folhas e as condições climáticas acumuladas ao longo desse período de vida (Leblanc and Chen, 2001). Para as espécies que podem mudar as folhas durante a estação de crescimento como, por exemplo, choupos, os dados das armadilhas dariam uma superestimação do IAF. Além disso, o método não obtém informações sobre perfis temporal e vertical do IAF, enquanto os outros métodos diretos pode fornecer essa informação, se devidamente implementada. O método de armadilha é muito menos trabalhoso do que os métodos destrutivos, mas carrega a suposição adicional de que a folhagem recolhida é representativa para a queda de folhas de todo o povoamento. Esta condição estatística apenas pode ser usada através da incorporação de um número elevado de coletores, por unidade de área. Alguns pesquisadores defendem a colocação dos coletores aleatoriamente sob os povoamentos, enquanto outros preferem um desenho de amostragem sistemática (Bréda, 2003) ou transeptos.

### **1.1.2 Técnicas de determinação da área foliar**

Após a recolha das folhas, a área foliar (AF) pode ser calculada por meio de um planímetro ou técnicas gravimétricas. A abordagem planimétrica baseia-se no princípio da correlação entre a área foliar individual e do número de unidades de área coberta pela folha, num plano horizontal. Para isso, uma folha pode ser fixada na horizontal a uma superfície plana, o seu perímetro pode ser medido com um planímetro, e a sua área pode ser calculada a partir desta avaliação. Existem vários tipos de planímetros diferentes no mercado para este fim. Um primeiro tipo é o planímetro de digitalização (Li-3000,

Licor, Nebraska), que utiliza um método de eletrônica de aproximação retangular. A folha é puxada através da cabeça de leitura, medindo assim a sua área. A cabeça de leitura pode ser combinada com um transportador de correia transparente com velocidade constante, a fim de medir um grande número de folhas isoladas.

Outros planímetros de digitalização (Li-3100, Licor, Nebraska) fazem uso de uma fonte de luz fluorescente e uma câmara de varrimento de estado sólido para detetar a área das folhas à medida que se movem através do instrumento. O planímetro de digitalização portátil, CI-201 (Delta-T dispositivos, Cambridge) usa um leitor de código de barras para codificar o comprimento da folha que o sensor desloca ao longo da folha. Largura da folha é medida pelo reflexo da luz da folha para os detetores.

O Ci-251 analisador de imagem transportador (dispositivos Delta-T, Cambridge) tem uma resolução espacial muito alta e é capaz de armazenar e transferir imagens para um computador para análises adicionais. Um segundo tipo de planímetro é o sistema de análise de imagem de vídeo, constituída por uma câmara de vídeo, um digitalizador de armação, um monitor, e um computador com software apropriado para analisar os dados. Um exemplo é o Decagon Ag Vision System (dispositivos Decagon, Inc, Pullman, EUA) que pode proporcionar áreas, tamanhos, formas e número de folhas. Uma imagem das folhas achatadas é digitalizado, reforçada e analisado para discriminar as folhas a partir do fundo.

O método gravimétrico correlaciona o peso seco das folhas e a área foliar usando relações entre folha verde/área/peso seco MFA (Massa Foliar por Área). A MFA é determinada a partir de uma amostra sub extraída da amostra de campo global. Após a determinação da área de folha usando um dos métodos acima citados planimétricos, a sub-amostra é seca em estufa a cerca de 75-105°C, até um peso constante. O peso seco é posteriormente determinado utilizando uma balança de precisão. Uma vez calculada a MFA, a amostra total de campo é seca em estufa e a área foliar é calculada a partir do seu peso seco, e a MFA subamostra. É importante a amostra ter uma mistura de folhas de sol e sombra, além disso, devemos ter atenção às grandes variações espaciais e temporais nos valores de MFA que foram calculados com muitas espécies de árvores. Por exemplo, o MFA varia significativamente com a idade, ramo, a exposição à luz, e a altura da copa. O método gravimétrico é conveniente quando IAF tem de ser estimados através das amostras de folhas muito grandes.

Por causa de seu caráter demorado e trabalhoso e para além de outras restrições operacionais, pode-se dizer que a determinação do IAF direta não é realmente compatível com o acompanhamento a longo prazo da dinâmica espacial e temporal de desenvolvimento da área foliar.

## **1.2 MÉTODOS INDIRETOS PARA DETERMINAR O IAF**

Os métodos indiretos, no qual a área da folha é inferida a partir de observações de uma outra variável, são geralmente mais rápidas, pode ser alterada para uma leitura mais direta, e, assim, permitir uma maior amostragem espacial a ser obtido. Por razões práticas, quando comparados com os métodos diretos, estes métodos têm um interesse maior.

### **1.2.1 Métodos dos quadrats pontuais inclinados**

Este método baseia-se na introdução de uma sonda metálica na copa, segundo um ou mais ângulos zenitais e azimutais, sendo registado o número de vezes (frequência de contactos) que a sonda contacta com os elementos da copa, nomeadamente com as folhas. A aplicação deste método parte do pressuposto de que as folhas se encontram distribuídas aleatoriamente no copado.

A precisão das estimativas do IAF obtidas com este método está dependente, por um lado, da existência de uma amostra de dados suficientemente grande e, por outro lado, de se verificar o pressuposto da distribuição aleatória das folhas.

O método dos quadrats pontuais pode ser utilizado também, pelo menos teoricamente, para verificar em que medida existe, ou não, uma distribuição aleatória das folhas. Num copado com elementos distribuídos aleatoriamente, a distribuição de probabilidade de contacto de uma sonda com esses elementos é a distribuição de Poisson (Bréda, 2003). Nesta distribuição a média e a variância possuem valores iguais. Assim, num copado com elementos distribuídos aleatoriamente, a razão variância/média do número de contactos deve ser igual à unidade. No entanto, o cálculo da variância exige ainda maiores amostras do que o simples cálculo da média, o que, por razões de ordem prática, limita bastante a execução deste tipo de verificação.

Wang *et al.* (2005) referem várias alternativas à utilização da sonda metálica, como é o caso da sonda laser, ou das sondas motorizadas com registo automático do número de

contactos. As sondas laser permitem acelerar as medições, mas os dados obtidos referem-se só ao primeiro contacto com a copa.

A utilidade do método dos quadrats pontuais em avaliações do IAF em grandes áreas é, no entanto, bastante limitada, devido ao tempo necessário para a recolha de dados e também às limitações impostas pela altura das copas dos povoamentos florestais adultos, em que geralmente não é viável a utilização de uma sonda metálica.

O método dos quadrats pontuais inclinados apresenta, hoje, sobretudo um valor histórico, tendo sido inicialmente proposto por Levy and Madden (1933) e melhorado para plantações em linha e plantas individuais por Warren Wilson (1965), como descrito por Campbell and Madden (1990).

### **1.2.2 Métodos baseados na análise da fração de “espaços vazios” do copado**

Os métodos baseados na análise da fração de “espaços vazios” do copado, conhecidos por “gap fraction analysis methods”, baseiam-se na determinação da probabilidade de um dado volume de copa ser atravessado por uma sonda sem intercalar qualquer elemento da copa (frequência de “espaços vazios”). Normalmente, é a própria luz solar que funciona como sonda na aplicação destes métodos. A probabilidade de atravessamento da luz é a função da área foliar acumulada, da distribuição angular dos elementos foliares e do ângulo de incidência da luz solar (Chason *et al.*, 1991).

A fração de “espaços vazios” da copa de um determinado coberto vegetal pode ser medida empregando várias técnicas, nomeadamente, utilizando fotografias hemisféricas do copado (Leblanc and Chen, 2001); por avaliação da área das manchas de luz existentes debaixo da copa devidas à penetração direta dos raios solares (conhecidas como sunflecks) (Martens *et al.*, 1993); ou por avaliação da fração da radiação solar que atravessa o copado (transmitância) (Lang, 1991).

Os dados da fração de “espaços vazios” são, frequentemente, combinados com um modelo de transferência radiativa do copado, para que as estimativas de parâmetros descritores da estrutura da copa possam ser obtidas por um processo de inversão (Lang, 1991; Wang *et al.*, 2005). O termo inversão refere-se ao processo matemático através do qual a variável independente é transformada em variável dependente.

Nos diversos estudos do IAF existentes, têm sido utilizados vários tipos de modelos de transferência radiativa, sendo os dois mais comuns, a aplicação da Lei de Beer-Lambert e o modelo de inversão unidimensional proposto por Soudani *et al.* (2001).

### 1.2.3 O modelo de Beer-Lambert

A Lei de Beer-Lambert descreve a atenuação, num sistema bastante simples, em que a radiação de um determinado comprimento de onda é absorvida, mas não dispersada, ao passar através de um meio homogêneo (Bréda, 2003). A relação entre a irradiância antes e após o atravessamento do copado é expressa da seguinte forma:

$$I_2 = I_1 \cdot \exp^{-K \cdot m} \quad (1)$$

Onde:

$I_1$  – Irradiância antes do atravessamento do meio.

$I_2$  - Irradiância após atravessamento do meio.

$m$  – Espessura ótica do meio.

$K$  – Coeficiente de extinção.

Resolvendo a equação em ordem a  $m$ , resulta que:

$$m = -\frac{\log(T)}{K}, \quad (2)$$

Onde  $T$  representa a transmitância da radiação,

$$T = \frac{I_2}{I_1}. \quad (3)$$

O IAF pode ser usado para definir a espessura ótica ( $m$ ), apresentando o modelo de Beer-Lambert para avaliação do índice de área foliar, ou seja, matematicamente invertido, da seguinte forma:

$$IAF = -\frac{\log(I_b/I_a)}{K} \quad (4)$$

Onde:

$I_b$ , representa a irradiância debaixo do copado;

$I_a$  a irradiância acima do copado;

$I_b/I_a$  a transmitância do copado à radiação (o que também pode ser interpretado como a fração de “espaços vazios” da copa).

O valor  $K$  é designado como o coeficiente de extinção (ou de atenuação) da radiação e

representa o declive da relação entre o IAF e o  $-\log(T)$ .

A utilização do IAF como definidor da espessura ótica de um meio homogêneo parte, assim, dos pressupostos de que os elementos da copa se encontram distribuídos aleatoriamente no espaço e de que existe uma distribuição esférica, ou uniforme, para os ângulos das folhas (Martens *et al.*, 1993). Além disso, considera-se ainda, que os elementos foliares são opticamente negros, para que a dispersão e transmissão da radiação possa ser desprezada (Soudani *et al.*, 2001).

Para se aplicar este modelo de estimar o IAF é necessário, para além da medição da transmitância da copa (Fig. 1.1), conhecer o valor de K a atribuir ao povoamento.

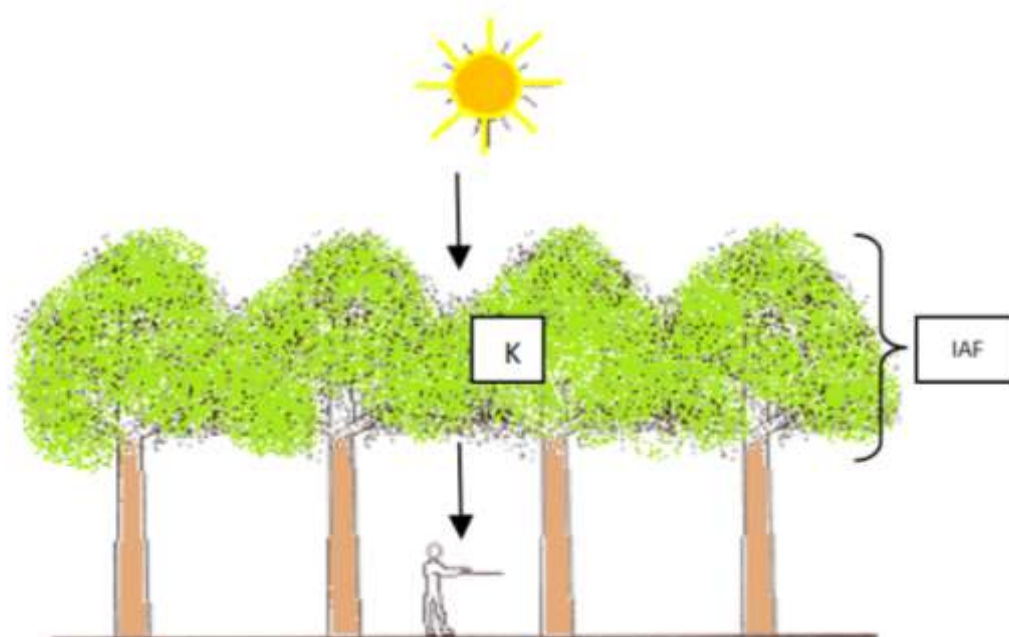


Figura 1.1 - Esquema da interação da radiação solar com o copado descrito pelo modelo de Beer-Lambert.

Fonte: adaptado de Soudani *et al.* (2001)

Normalmente, o valor do coeficiente de extinção (K) a utilizar é avaliado em povoamentos em que se determina o IAF e a transmitância da copa, ou alternativamente, é retirado da literatura.

Na tabela 1.2 encontram-se alguns exemplos de valores de K utilizados em vários estudos para avaliar o IAF a partir da Lei de Beer-Lambert. No entanto, como é exemplo a comparação efetuada por Bolstad and Gower (1990) entre os valores de K

por eles obtidos e os reportados em outros estudos (Martens *et al.*, 1993), é frequente haver para a mesma espécie diferentes estimativas de valores de K, devido a diferenças na estrutura do copado, protocolos de amostragem, ângulos solar zenital e azimutal ou, inclusivamente, nos métodos utilizados para o desenvolvimento dos modelos. Portanto, pode-se concluir que os valores de k são específicos para determinadas condições de avaliação e que dificilmente a aplicação do modelo de Beer-Lambert com um valor de K calculado sob determinadas circunstâncias produzirá estimativas rigorosas do IAF, numa situação em que as condições não sejam mantidas idênticas.

Tabela 1.2 - Exemplos de valores de K e de aparelhos para a avaliação da transmitância (ou da fração de espaços vazios) utilizados em avaliações do índice de área foliar a partir do modelo de Beer-Lambert.

<b>K</b>	<b>Avaliação da transmitância</b>	<b>Copado</b>	<b>Local</b>	<b>Fonte</b>
<b>0,48</b>	Técnica do papel ozalid	Pseudotsuga menziessi	EUA (Oregon W)	Marshall and Waring, 1986
<b>0,52</b>	Sunfleck Ceptometer	Coníferas	EUA (Montana W)	(Pierce and Running, 1988)
<b>0,85</b>	Sunfleck Ceptometer	Pinus strobus	EUA (Wisconsin W)	(Bolstad and Gower, 1990)
<b>0,45</b>	Sunfleck Ceptometer	Pinus strobus	EUA	Jarvis e Leverenz, 1983
<b>0,50</b>	Sensor multicone	Eucalyptus globulus	Portugal (Óbidos)	Gazarini <i>et al.</i> , 1990
<b>0,32</b>	Termopares	Pinus pinaster (plantação de 20 anos)	França (Les Landes)	Berbigier and Bonnefond, 1994

Fonte: adaptado de Martens *et al.* (1993)

Como explicam Bolstad and Gower (1990) o termo K pode ser interpretado como o “filtro” que descreve matematicamente a atenuação que a radiação solar é sujeita ao atravessar um determinado copado. A forma do K pode, assim, depender do grau de conhecimento que se possua acerca do copado em estudo. Por exemplo, para árvores espaçadas o “filtro” poderá ser mais complicado do que a simples atribuição de um valor fixo, como é feito na forma mais geral da aplicação da Lei de Beer-Lambert. Desta forma, é questionável que o K seja só uma função da espécie, como é geralmente



considerado, e não se entre de conta com as características do povoamento.

#### **1.2.4 Métodos alométricos**

Os chamados métodos alométricos de avaliação do IAF, são métodos baseados no desenvolvimento e aplicação de modelos de regressão que descrevem a relação biométrica que se pode estabelecer entre variáveis dimensionais das plantas e a respetiva área foliar ou biomassa. Uma vez desenvolvidos esses modelos é possível estimar a área foliar das plantas individuais, por medição de variáveis explicativas. O somatório das áreas foliares das plantas a dividir pela superfície de terreno onde estas se encontram, permite obter o IAF (Brenner *et al.*, 1995).

Para o desenvolvimento destes modelos é necessário um conjunto de dados de campo de plantas em que se conheça a área foliar e o valor de potenciais variáveis explicativas como o diâmetro à altura do peito (DAP), diâmetro da base da copa (DBC), altura (ALT), etc. A área foliar é avaliada por métodos diretos para situações de plantas individuais dispersas. A aplicação de métodos diretos exige um importante esforço de trabalho de campo na recolha de dados para a construção dos modelos.

Uma quantidade apreciável de modelos alométricos para prever a área foliar utiliza a área do borne (AB) como variável explicativa (Gower *et al.*, 1999). A justificação para esta tão vasta utilização tem por base na teoria “pipe model”, que propõe que uma dada unidade de área de tecido condutor de água (borne), em qualquer ponto do tronco, é necessária para fornecer água a uma dada unidade de peso de folhagem transpiradora, acima desse ponto. Na prática, têm-se verificado existir uma boa correlação entre a área do borne e a área foliar. No entanto, como expresso em Pereira *et al.* (1997), a variável que controla a relação AF-AB ainda não foi claramente identificada, uma vez que a área de tecido condutor não é nunca um fator limitativo da quantidade de folhagem, sendo portanto questionável a existência de uma relação causal entre área de borne e área foliar. Por outro lado, a avaliação desta variável no terreno, de forma sistemática, é muito pouco eficiente em termos de tempo. Desta forma, cada vez mais se tem considerado a construção de modelos que utilizem como variáveis explicativas outras variáveis da árvore individual ou do povoamento. Uma enumeração de algumas destas variáveis pode ser encontrada em (Pereira *et al.*, 1997). Têm sido utilizados vários tipos de modelos de regressão para explicar a variabilidade da área foliar em função de

variáveis dendrométricas. Os modelos apresentados vão desde relações estabelecidas por regressão linear simples entre a área foliar e a área do borne ao nível do DAP até modelos mais complexos que utilizam um maior número de variáveis (Whitford *et al.*, 1995). Modelos não lineares baseados em generalizações da equação alométrica, que assume taxas de crescimento relativo proporcionais para partes diferentes da planta (Bolstad and Gower, 1990), têm tido um uso frequente, como exemplo apresenta-se a seguinte equação:

$$Y = K.X_1^{b_1}.X_2^{b_2} \dots \dots X_n^{b_n} \quad (5)$$

Onde:

y está alométricamente relacionado com as variáveis;

$X_i, b_i$  são as constantes alométricas;

K depende das condições iniciais e das unidades das variáveis.

A quantidade de folhas nas árvores apresenta flutuações sazonais, de maior ou menor amplitude consoante a espécie, e a partir de certa idade, densidade do povoamento ou tamanho das próprias árvores, tende a estabilizar em torno de um dado valor. As variáveis dendrométricas utilizadas como explicativas da área foliar (diâmetro à altura do peito, a altura da árvore, etc.) apresentam uma variação temporal diferente, exibindo um crescimento essencialmente monotónico. Desta forma, idealmente, os modelos alométricos devem ser desenvolvidos a partir de dados de campo respeitantes a um único período de tempo, e aplicados para o mesmo momento e local de recolha de dados. No entanto, esta situação nem sempre é possível, sendo o valor de AF estimado com os modelos alométricos um valor aproximado da área foliar existente em cada árvore.

Um aspeto a considerar no desenvolvimento e aplicação dos modelos alométricos é a variação da área foliar das árvores no tempo e no espaço (tabela 1.3).

Tabela 1.3 - Exemplo de modelos alométricos para estimar a área foliar das árvores individuais.

Espécie	Local	Modelo	n	R <sup>2</sup>	Fonte
<i>Pinus ponderosa</i> Laws.	EUA (Montana)	$AF_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot AB_{DAP}$ (6)	40	0,93	(McLeod and Runnins, 1988)
<i>Eucalyptus globulus</i>	Portugal (Centro)	$AF = (b_0 + b_1 G) \cdot DAP^2 \cdot ABC^{\beta_1 + \beta_2 \cdot G}$ (7)	88	0,83	(Pereira et al., 1997)
<i>Eucalyptus marginata</i>	Austrália (SW)	$AF_t = \beta_0 \cdot DAP_{sc} \beta_1 \cdot d^{\beta_2} \cdot W^{\beta_3} \cdot e^{-\beta_4 f}$ (8)	72	0,93	(Whitford et al., 1995)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	EUA (Washington)	$AF = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log(DAP)$ (9)	13	0,97	(Gower et al., 1999)

Fonte: adaptado de (Pereira et al., 1997)

Onde:

- 1)  $AF_t$  – Área Foliar total (i.e. 2 lados da folha);  $AB$  – Área de Borne ao nível do DAP.
- 2)  $AF$  – Área Foliar;  $DAP$  – Diâmetro à Altura do Peito;  $ABC$  – Altura da Base da Copa;  $G$  – Área Basal por hectare do povoamento.
- 3)  $AF$  – Área Foliar total;  $DAP_{sc}$  – Diâmetro à Altura do Peito sem casca;  $d$  – Valor da densidade da copa de Grimes (1.0 – 9.0);  $W$  – Largura da copa;  $f$  – Valor da avaliação da frutificação (1.0 – 5.0).



## **2. OS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E A DETECÇÃO REMOTA**

A detecção remota (DR) afirmou-se como sendo uma das mais importantes fonte de dados utilizadas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), sendo este conjunto de ferramentas essencial para o desenvolvimento de trabalhos de caraterização de áreas, gestão e planeamento do território, entre outras. A disponibilidade da informação da DR de diversas plataformas e com um alargado leque de resoluções espaço-temporais, radiométricas e espetrais, tornaram a melhor fonte de informação para aplicação de grande escala (Melesse *et al.*, 2007).

Grande parte dos trabalhos de DR tem como objetivo final um mapa temático que espelha o estado da variável de interesse na área de estudo, tais como o tipo de solo ou a vegetação (Chuvieco, 1990).

Para uma associação de processos de modelação espacial, os SIG adaptam-se na perfeição, como por exemplo na previsão de risco de incêndio, usando alguns parâmetros (elevações, vegetação, encostas, biomassa e dados meteorológicos). O resultado desta informação será um mapa temático onde se identifica as zonas mais suscetível a incêndios.

Dado o SIG ter capacidades analíticas únicas, estes juntamente com a DR, devem ser vistos como tecnologias complementares.

### **2.1 OS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA**

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), atualmente são utilizados nas mais diversas áreas de trabalho, o que torna difícil a sua definição, embora nos últimos anos assumiram-se apenas como um software de computador onde é possível guardar e utilizar dados que descrevam lugares da superfície terrestre.

O progresso das tecnologias digitais, na opto-eletrónica, na micro-informática, nas telecomunicações, no controlo remoto, e o avanço concomitante em disciplinas científicas tais como a computação numérica e gráfica, o processamento de sinais e de imagens digitais, a organização de estruturas de bases de dados relacionais, etc., permitiram o advento dos sistemas de informação geográfica (SIG), dos sistemas de sensoriamento remoto (SSR), dos sistemas de fotogrametria digital (SFD), e dos

sistemas de posicionamento geodésico por satélites (GPS). Assim, a Informação Geográfica assume um papel importante nos sistemas de informação porque grande parte da informação é direta ou indiretamente georeferenciável.

Os SIG são considerados sistemas de informação que mantem o registo e o local dos eventos, atividades e objetos (Longley *et al.*, 2005). Os SIG podem ser definidos como mapas espaciais, um software que relaciona a informação geográfica com a informação descritiva. Uma das vantagens do SIG em relação ao papel é que tem várias camadas (layers), onde podemos produzir vários mapas com informação que cruzamos. Ou seja, o SIG utiliza computadores e programas para organizar informação, desenvolver e comunicar dados.

É bastante complicado encontrar uma definição única que defina Sistema de Informação Geográfica (SIG) devido à utilização por várias áreas científicas. A definição de Burrough (1996) é a que sintetiza melhor o conceito: “um grupo poderoso de ferramentas para armazenar e retomar quando pretendido, transformar e visualizar dados espaciais do mundo para um conjunto particular de propósitos”.

Nos últimos anos, a tecnologia aplicada a sistemas de informação geográfica, tem tido uma aplicação generalizada em vários campos, sendo essencial para resolver diversos problemas. Um aumento significativo das capacidades de hardware e software, acompanhado por uma diminuição de custos, possibilitou um aproveitamento maior das potencialidades dos SIG.

Podemos dizer que enquanto tecnologia, os SIG mudaram na facilidade de utilização e como capacidade de análise. Hoje em dia, usar esta tecnologia é simples, mais complexo é o conhecimento da área temática a analisar. Segundo (Pires *et al.*, 2010) o ambiente de programação, a difusão da internet e WEBSIG, plataformas de SIG móveis e organização de informação em bases de dados espaciais são fatores determinantes para a evolução dos SIG.

A proliferação da internet teve um papel determinante no desenvolvimento dos SIG nos últimos anos, tornando-os acessíveis para toda a população. São acedidas milhares de aplicações na WEB por vários utilizadores para resolução de problemas de cariz geográfico, ou apenas para “viajar” pelo mundo, como no Google Maps.

## 2.2 COMPONENTES DE UM SIG

Segundo Longley *et al.* (2005) o principal componente de um SIG é a rede, pois sem ela a troca de informação e a sua rapidez não era possível. Por isso, as vantagens da rede nos SIG são muitas, permite visualizar, consultar e analisar informação espacial sem ser necessário instalar nenhum software nem descarregar grandes quantidades de dados.

No geral, pode-se considerar os componentes de um SIG como: entrada de dados; armazenamento de dados; manipulação e análise de dados e saída de dados. Um SIG é composto por um conjunto de elementos distintos como mostra a figura 2.1.

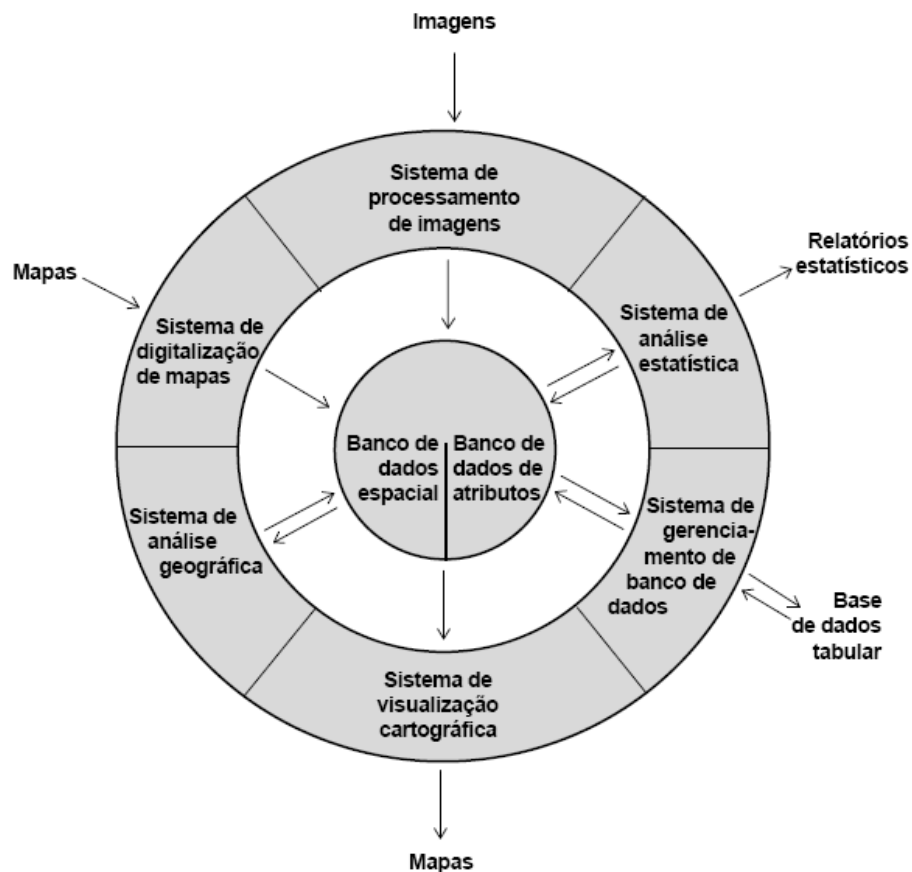


Figura 2.1 - Funcionalidades de um SIG  
Fonte: adaptado de Eastman (2006)

Num SIG, as funções para a entrada de informação são as que permitem a introdução, edição e visualização de dados geográficos. Estas funções podem parecer menos importantes em relação às outras, mas sem elas seria impossível iniciar todo o trabalho e

pode mesmo espelhar a qualidade do resultado final.

Uma vez capturada a informação geográfica, e quase sempre são produzidas quantidades grandes de dados, deverá ser armazenada de forma organizada e segura. Depois de capturada e armazenada a informação geográfica, o próximo passo é extrair a base de dados do SIG que interessam em cada momento.

As funções de análise espacial são sem dúvida as mais representativas dos SIG são as atribuem o valor dos dados geográficos.

Finalmente, as funções de saída e representação gráfica da cartografia de informação de um SIG, são as que permitem transferir os dados, imagens ou mapas noutra meio de suporte. Deste modo podemos representar os dados armazenados a partir de vários critérios que permitiram visualizar a informação em função dos objetivos estabelecidos.



### 3. PRODUTOS DE DETEÇÃO REMOTA

A Detecção Remota surge como uma ciência importante na medida em que permite a obtenção de informação dos objetos presentes na superfície terrestre, através do estudo da interação da radiação eletromagnética emitida por fontes naturais ou artificiais (Chuvieco, 1990).

A mais generalizada das definições da DR é a seguinte: “A deteção remota compreende um conjunto de técnicas, que permitem a obtenção de informações acerca de um objeto, área ou fenómeno através da análise de dados adquiridos à distância, por instrumentos que não estão em contacto com o objeto, área ou fenómeno em estudo” (Chuvieco, 1990; Lillesand *et al.*, 2004).

Qualquer tentativa de uma definição mais específica torna-se difícil, uma vez que não é sempre o ambiente natural que é analisado (p. ex., aplicações na conservação de arte); o tipo de energia não é sempre eletromagnética (p. ex., sonar) e alguns métodos medem emissão de energia natural (p. ex., infravermelho térmico), em vez de interações de energia proveniente de uma fonte independente (Eastman, 2006).

O registo da radiação emitida pela terra, em sensores remotos, permite a interpretação, compreensão e medição da energia eletromagnética que é refletida ou emitida desde a superfície da terra ou da atmosfera, e o estabelecimento de relações entre estas medidas com a natureza e distribuição dos fenómenos que ocorrem sobre a superfície terrestre e no interior da atmosfera (Lillesand *et al.*, 2004).

Da radiação eletromagnética que é refletida pela superfície terrestre, apenas uma porção do espectro eletromagnético é captado pelos sensores de deteção remota (Lillesand *et al.*, 2004).

Os dados adquiridos podem ser analisados para produzir informação sobre os recursos em estudo de acordo com os objetivos do trabalho a realizar, nomeadamente em trabalhos de carácter territorial, especialmente em estudos de análise dos sistemas ambientais.

Na figura 3.1 estão divididos os dois processos envolvidos em detecção remota, a captura de dados e sua análise.

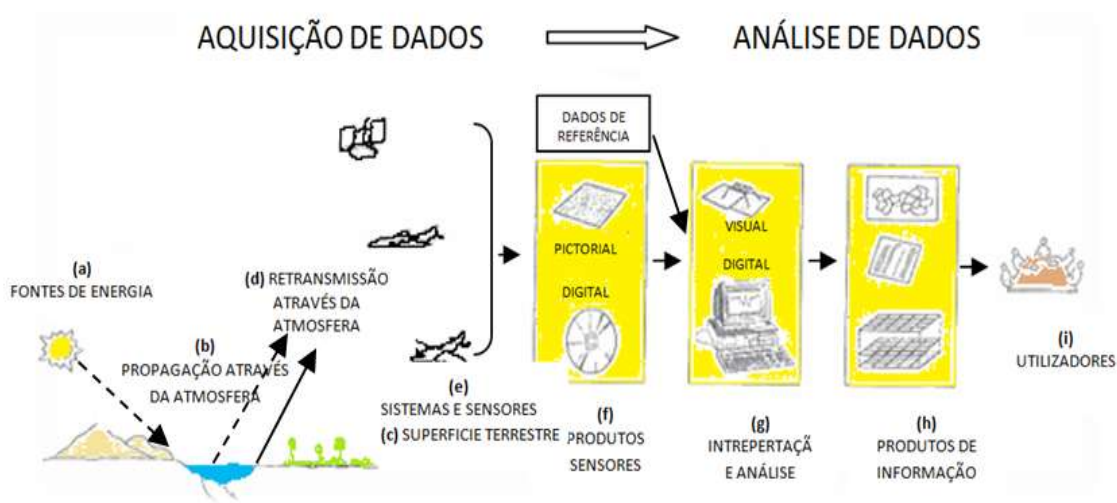


Figura 3.1 - Componentes de um sistema de detecção remota  
Fonte: adaptado de (Lillesand *et al.*, 2004)

Os elementos do processo de captura de dados são: (a) as fontes de energia, (b) a propagação da energia através da atmosfera, (c) interação da energia com as características da superfície da terra, (d) retransmissão da energia através da atmosfera, (e) sensores aéreos e espaciais, resultando numa (f) generalização dos dados no formato analógico ou digital. Resumindo, usam-se sensores para gravar variações na trajetória da energia eletromagnética refletida e emitida pelas características da superfície da terra (Lillesand *et al.*, 2004).

O processo de análise de dados (g) envolve a análise e interpretação dos dados, usando vários pontos de vista e planos de interpretação para analisar dados analógicos e/ou ferramentas informáticas para analisar dados de um sensor digital. Com a adição de dados de referência, o analista extrai informação acerca do tipo, extensão, localização e condição de vários recursos com base nos dados recolhidos pelo sensor. A informação pode ser então compilada (h), geralmente na forma de mapas e/ou tabelas, bem como em ficheiros informáticos que se podem juntar a outros layers de informação num Sistema de Informação Geográfica (SIG). Por último, a informação é apresentada aos (i) utilizadores utilizando-a nos processos de análise e tomada de decisão (Lillesand *et al.*, 2004).

Dos diversos produtos de DR disponíveis, alguns destes encontram-se já processados contendo diversas variáveis da vegetação, como por exemplo o tipo de cobertura do solo, índices de vegetação, PPB, PPL e o IAF.

### **3.1 SATÉLITE TERRA / SENSOR MODIS**

O Sistema de Observação da Terra *Earth Observing System* (EOS), peça central do Programa lançado pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), chamado de Earth Science Enterprise (ESE), para estudos globais da superfície terrestre, fenômenos físicos, químicos e biológicos do planeta Terra e da atmosfera, é o programa mais ambicioso que existe no momento, nos satélites vocacionados para a recolha de dados sobre a Terra .

O programa Earth Science Enterprise é composto de três segmentos: 1) uma série de satélites de observação da Terra; 2) um avançado sistema de banco de dados e 3) uma equipa de cientistas que estudará os dados. As áreas de estudo chaves incluem: nuvens, ciclo da água e energia; oceanos; química da atmosfera; uso da terra; processo da água e ecossistema; cobertura de gelo glacial e polar e a parte sólida da Terra.

Foi lançado a 18 de Dezembro de 1999, da base da Força Aérea de Vandenberg na Califórnia, o primeiro Sistema de Observação da Terra (EOS), denominado satélite TERRA (formalmente designado EOS AM-1), com vista a atender aos objetivos desse programa. O satélite TERRA possui órbita polar, sincronismo solar, cruza o equador às 10h e 30 min e carrega a bordo vários sensores: o CERES, o MOPITT, o MISR, o MODIS e o ASTER (NASA, 2013c).

O MODIS é um dos cinco instrumentos a bordo do satélite TERRA (formalmente conhecido como EOS-AM-1). Para satisfazer os requerimentos de três campos de estudos diferentes, foi projetado este sensor: oceano e terra, atmosfera, com bandas de resolução espectral e espacial selecionadas para o conhecimento de diferentes necessidades observacionais, oferecendo uma cobertura global quase diariamente (Justice *et al.*, 2002).

As especificações técnicas deste sensor estão dispostas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Especificações Técnicas do Sensor MODIS.

<b>Órbita</b>	705 Km, síncrona com o Sol, polar; 10:30 a.m descendente; 1:30 p.m ascendente.
<b>Alcance Espectral</b>	0.4 – 14.4 $\mu\text{m}$
<b>Cobertura Espectral</b>	Mais ou menos 55°, 2330 Km em fileira (“scans” contínuos em nadir no equador)
<b>Resolução Espacial</b>	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1000 m (29 bandas) em nadir
<b>Precisão Radiométrica</b>	5 % absoluto, < 3 $\mu\text{m}$ ; 1% absoluto, > 3 $\mu\text{m}$ ; 2 % de refletância
<b>Cobertura de Repetição</b>	Diária, a norte da latitude 30° e a cada dois dias, para latitudes inferiores a 30°
<b>Quantização</b>	12 bits
<b>Taxa de Dados</b>	6.2 Mbps (média), 10.8 Mbps (dia), 2.5 Mbps (noite)
<b>Força</b>	162.5 W (média para uma órbita), 168.5 W (pico)

Fonte: adaptado de NASA (2013c).

As 36 bandas espectrais deste sensor estão localizadas (tabela 3.2 e 3.3) em função de um comprimento de onda, cuidadosamente escolhido para a observação de feições das propriedades das nuvens, dinâmica e as propriedades da vegetação na cobertura terrestre, e a temperatura da superfície dos oceanos no mundo (Salomonson and Toll, 1990). Estas especificações têm como objetivo evitar as bandas de absorção atmosférica durante a observação e monitoramento da superfície terrestre (Salomonson and Barker, 1992; Strahler, 1999).

As primeiras 19 bandas estão posicionadas na região do espectro eletromagnético situado entre 405 nm a 2155 nm, de forma que as bandas 1-7 estão direcionadas para as aplicações terrestres; as bandas 8-16 para as observações oceânicas e as bandas 17-19 para as medições atmosféricas.

Tabela 3.2 - Especificações das Bandas 1 a19 do Sensor MODIS.

<b>Uso Primário</b>	<b>Banda</b>	<b>Largura de Banda (nm)</b>	<b>Resolução Espacial</b>	<b>SNR (Signal to noise ratio)</b>
<b>Superfície terrestre /nuvem</b>	1	620-670	250	128
	2	841-875	250	201
<b>Propriedades da superfície / nuvem</b>	3	459-479	500	243
	4	545-565	500	228
	5	1230-1250	500	74
	6	1628-1652	500	275
	7	2105-2155	500	110
<b>Cor dos Oceanos /Fitoplâncton /Bioquímica</b>	8	405-420	1000	880
	9	438-448	1000	838
	10	483-493	1000	802
	11	526-536	1000	754
	12	546-556	1000	750
	13	662-672	1000	910
	14	673-683	1000	1087
	15	743-753	1000	586
	16	862-877	1000	516
<b>Vapor de água Atmosférico</b>	17	890-920	1000	167
	18	931-941	1000	57
	19	915-965	1000	250

Fonte: adaptado de NASA (2013c).

As bandas 20-36 (tabela 3.3), com exceção da banda 26 (1360-1390 nm), cobrem a porção termal do espectro (3660nm a 14385nm) e podem ser utilizadas por diferentes campos das ciências naturais (Bruce *et al.*, 2006).

Tabela 3.3 - Especificações das Bandas 20 a 36 do Sensor MODIS.

<b>Uso Primário</b>	<b>Banda</b>	<b>Largura de Banda (nm)</b>	<b>Resolução Espacial</b>	<b>DED T (doise equivalente temperature difference)</b>
<b>Temperatura nuvens/superfície</b>	20	3660-3840	1000	0,05
	21	3929-3989	1000	2,00
	22	3929-3989	1000	0,07
	23	4020-4080	1000	0,07
<b>Temperatura Atmosférica</b>	24	4433-4498	1000	0,25
	25	4482-4549	1000	0,25
<b>Cirrus</b>	26	1360-1390	1000	150
<b>Vapor de água</b>	27	6535-6895	1000	0,25
	28	7175-7475	1000	0,25
	29	8400-8700	1000	0,05
<b>Ozônio</b>	30	9580-9880	1000	0,25
<b>Temperatura nuvens/superfície</b>	31	10780-11280	1000	0,05
	32	11770-12270	1000	0,05
<b>Altitude</b>	33	13185-13485	1000	0,25
<b>Topo da nuvem</b>	34	13485-13785	1000	0,25
	35	13785-14085	1000	0,25
	36	14085-14385	1000	0,35

Fonte: adaptado de (NASA, 2013c).

É pertinente salientar que, devido à natureza altamente quantitativa dos objetivos do EOS, as especificações para as características radiométricas, espectrais e geométricas dos instrumentos foram muito severas (Bruce *et al.*, 2006).

Os produtos MODIS de índices de vegetação fornecem comparações consistentes de dados temporais e espaciais das condições da vegetação global, para monitorar a atividade fotossintética da vegetação em suporte a detecção de mudança e interpretações biofísicas e da fenologia. Os objetivos dos índices de vegetação do MODIS são:

- Gerar índices de vegetação em mapeamentos sem nuvens;
- Maximizar a cobertura global e temporal na resolução espacial mais fina possível;
- Padronizar dados de acordo com a posição sol-sensor-alvo;
- Assegurar a qualidade e a consistência dos dados
- Descrever e reconstituir dados de variações fenológicas;
- Discriminar com precisão variações inter-anuais na vegetação.

Os produtos MODIS relacionados ao estudo da vegetação são basicamente TRÊS: MOD13 – *Vegetation* Índices, MOD15 – *Leaf Area Index* / fPAR e MOD17 - *Net Primary Production* /*Net Photosynthesis*.

O MOD 13 possui dois índices de vegetação, o índice da diferença normalizada (NDVI) e o índice de vegetação melhorado (EVI), que são produzidos globalmente com 1 Km, 500 m e 250m de resolução e composições no período de 16 dias. Enquanto o NDVI é sensível à clorofila, o EVI é mais sensível às variações na resposta estrutural do copado, incluindo o índice de área foliar (IAF), a fisionomia da planta e a arquitetura da copa.

O MOD 15 é o Leaf Area Index (LAI) e a Fração da Radiação Absorvida pela Vegetação

Fotossinteticamente Ativa (FPAR), fornecidos diariamente, em uma base de 8 ou 32 dias. O IAF representa uma importante propriedade estrutural do dossel da vegetação, medindo a área de folhas por unidade de área de terreno. O FPAR mede as proporções da radiação disponível nos comprimentos de onda que a vegetação fotossinteticamente ativa absorve -400 a 700 nm.

O MOD 17 é um produto do nível 4, consistindo da medição de 8, 32 dias ou anual, da fotossíntese líquida e produtividade primária líquida. A produtividade primária é a taxa com que a energia luminosa é convertida em biomassa, e a soma total da energia convertida é denominada produtividade primária bruta. A produtividade líquida anual é a integração dos produtos de fotossíntese líquida ao longo de um ano. Este produto

fornece uma medida precisa do crescimento da vegetação terrestre e sua produtividade. O uso teórico é para definir o fluxo dinâmico do carbono na sazonalidade da superfície terrestre para o modelamento climático. Os fluxos são computados especificamente para cada tipo de vegetação. A utilidade prática é a estimativa de rendimento de colheita, a produtividade de florestas e alguns outros produtos significativos do crescimento da vegetação (NASA, 2013c).

### 3.2 PROGRAMA LANDSAT

O programa Landsat com os seus dados tem o registo mais extenso de observações da superfície da Terra a partir do Espaço (Fig. 3.2). Segundo Sabins, 1997 o programa Landsat é o maior contribuidor para o crescimento e aceitação da DR como disciplina científica.

Desde 1972, o projeto Landsat, da NASA, tem como principal missão de observar a terra.

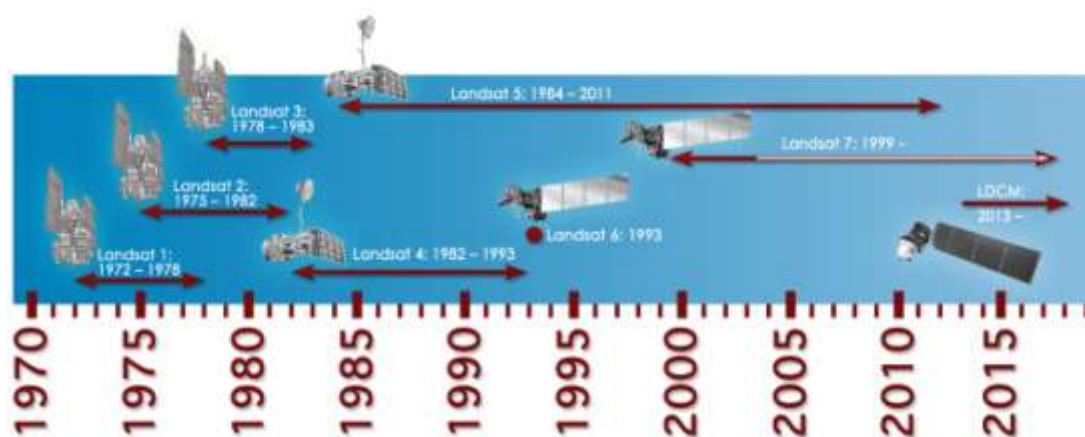


Figura 3.2 – Programa Landsat  
Fonte: adaptado de NASA (2013a).

Até hoje, milhões de imagens já foram produzidas pela família de satélites que tem papel fundamental na utilização e aperfeiçoamento dos algoritmos desenvolvidos ao longo dos últimos 30 anos de pesquisas na área da detecção remota.

O primeiro satélite especificamente desenvolvido para DR de recursos terrestres foi o Earth Resources Technology Satellite 1 (ERTS-1), lançado em 1972 pela National Aeronautics and Space Administration. O ERTS-1 foi construído a partir de uma modificação do satélite meteorológico NIMBUS e carregou a bordo dois tipos de



sensores: um sistema de varrimento multiespectral, o MSS (Multiespectral Scanner Subsystem) e um sistema de varrimento constituído por três câmaras de televisão (Return Beam Vidicon), denominadas por RBV. O sensor MSS provou ser de tão valiosa utilidade que, após o seu lançamento, o programa ERTS-1 foi rebatizado em 1975 para LANDSAT e seis outros satélites foram colocados em órbitas da Terra (NASA, 2013a).

Em 1982, foi lançado o Landsat 4 com dois sensores, o MSS e um novo sensor denominado Thematic Mapper (TM), com significativas melhorias na resolução, e com bandas adicionais. Em 1984, com o mesmo tipo de equipamento, foi lançado o Landsat 5.

O Landsat 6 foi lançado em 1993, mas falhou por não alcançar a órbita. O Landsat 7 foi lançado em 1999 com um sensor TM melhorado, denominado Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+), cuja melhoria mais significativa, de acordo com (Lillesand *et al.*, 2004), foi a adição de uma oitava banda, a pancromática, que regista imagens na banda entre 0,50  $\mu\text{m}$  a 0,90 $\mu\text{m}$ . As tabelas 3.4 e 3.5 dispõem da informação dos satélites do programa Landsat, bem como as características dos sensores, respetivamente.

No dia 11 de fevereiro de 2013 foi lançado da Base da Força Aérea norte-americana de Vandenberg, em Lampoc, na Califórnia, o oitavo satélite da série. O Landsat 8 está em fase de comissionamento e ficará em testes durante três meses. Depois disso, o controle operacional será transferido para a USGS. Os dados serão arquivados e distribuídos gratuitamente na internet, em um processo previsto para começar dentro de 100 dias depois do lançamento (NASA, 2013b).

O Landsat 8 é mais avançado que seus antecessores. Possui dois instrumentos imageadores, sendo um deles um sensor ótico (OLI – Operational Land Imager) com duas novas bandas, uma para observar nuvens de alta altitude (cirrus clouds) e outra para observar a atmosfera e a qualidade da água em lagos e águas costeiras rasas (coastal /aerosol) (NASA, 2013b).

Tabela 3.4 – Características do satélite Landsat 8 (B1 à B9)

<b>Banda Espectral</b>	<b>Comprimento de onda (µm)</b>	<b>GSD (m)</b>	<b>Resolução Radiométrica (bits/NC)</b>
<b>Banda 1 – Costeira / Aerossol</b>	0,433 – 0,453	30	12 / 4,096
<b>Banda 2 – Azul</b>	0,450 – 0,515	30	12 / 4,096
<b>Banda 3 - Verde</b>	0,525 – 0,600	30	12 / 4,096
<b>Banda 4 - Vermelho</b>	0,630 – 0,680	30	12 / 4,096
<b>Banda 5 - NIR</b>	0,845 – 0,885	30	12 / 4,096
<b>Banda 6 - SWR</b>	1,560 – 1,660	30	12 / 4,096
<b>Banda 7 - SWR</b>	2,100 – 2,300	30	12 / 4,096
<b>Banda 8 - PAN</b>	0,500 – 0,680	30	12 / 4,096
<b>Banda 9 - Cirrus</b>	1,360 – 1,390	30	12 / 4,096

Fonte: adaptado de NASA (2013b).

O outro é um sensor infravermelho termal, chamado TIRS (Thermal InfraRed Sensor). Ele gerará dados em duas bandas termais (tabela 3.5), em comparação com uma única banda termal em satélites Landsat anteriores, e será muito utilizado para monitorar o consumo de água, especialmente em regiões áridas dos Estados Unidos.

Tabela 3.5 - Características do satélite Landsat 8 (B10 e B11)

<b>Banda Espectral</b>	<b>Comprimento de onda (µm)</b>	<b>GSD (m)</b>	<b>Resolução Radiométrica (bits/NC)</b>
<b>Banda 10 – TIR</b>	10,30 – 11,30	100	12 / 4,096
<b>Banda 11 – TIR</b>	11,50 – 12,50	100	12 / 4,096

Fonte: adaptado de NASA (2013b).

### 3.3 PRODUTOS DE IAF DISPONÍVEIS A NÍVEL GLOBAL

#### 3.3.1 AVRH (Advanced Very High Resolution Radiometer)

O sensor AVHRR foi lançado a bordo do satélite da série NOAA. O instrumento AVHRR-2 esteve a bordo dos satélites NOAA-6 a NOAA-14, operou com 5 canais espectrais (tabela 3.6) dispostos nas regiões do visível (geralmente utilizados para estudos de vegetação) e infravermelho (geralmente utilizados para determinação de temperatura na superfície da terra e oceano). Cada satélite é capaz de obter duas coberturas da superfície terrestre diárias (uma diurna e outra noturna) (NOAASIS, 2013).

Tabela 3.6 – Características do sensor AVHRR

Canal	Faixas espectrais (nm)	Região do espectro	Principais aplicações
1	0.58 – 0.68	Vermelho	Mapeamento diurno de nuvem, gelo e neve. Definição de feições de solo e cobertura vegetal.
2	0.725 – 1.1	Infravermelho próximo	Delineamento da superfície de água. Definição de condições de fusão de neve e gelo. Avaliação da vegetação e monitoramento meteorológico (nuvens)
3	3.55 – 3.93	Infravermelho médio	Delineamento noturno e diurno de nuvens. Análise da temperatura da superfície do mar. Detecção de pontos quentes (incêndios)
4	10.30 – 11.30	Infravermelho termal	Mapeamento noturno e diurno de nuvens. Medição da superfície do mar, lagos e rios. Detecção de erupção vulcânica.
5	11.50 – 12.50		Humidade do solo, atributos meteorológicos das nuvens. Temperatura da superfície do mar e humidade do solo.

Fonte: adaptado de (NOAASIS, 2013)

O instrumento AVHRR-3 foi lançado a bordo dos satélites NOAA-15 a NOAA-18 e possuem um canal adicional em relação ao seu antecessor, localizado na região do infravermelho próximo, que é capaz de separar informação espectral proveniente da refletância de neve e de nuvens e consegue detetar a presença de aerossóis na atmosfera com melhor acurácia. O sensor AVHRR é aplicado na área de agricultura, principalmente em estimativas de fitomassa, índices de vegetação e monitoramento de queimadas.

Há alguns produtos disponíveis do IAF, derivados deste sensor, como exemplo (Prince, 2003) e Tucker (2004) que podem ser acedidos em <http://glcf.umd.edu/data/>.

### 3.3.2 SPOT Vegetation

O projeto do sensor VEGETATION (VITO, 2013) foi financiado pela União Europeia e desenvolvido pelo CNES em parceria com a Bélgica, Suécia e Itália, sendo lançado pela primeira vez a bordo do satélite SPOT-4. O sensor atua no monitoramento de mudanças ambientais, especializado em oferecer dados sobre cobertura vegetal e também com canais voltados aos estudos oceanográficos e correção de efeitos atmosféricos. O sensor VEGETATION-2 possui as mesmas configurações do antecessor e foi desenhado para possibilitar continuidade na aquisição de dados dessa plataforma. É capaz de fornecer imagens obtidas em um só dia (primárias) assim como obtidas em intervalos de 10 dias (sintéticas) (tabela 3.7).

Tabela 3.7 – Características do sensor VEGETATION

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área mapeada	Resolução Radiométrica
<b>VEGETATION e VEGETATION-2</b>	B0	0,43 - 0,47 $\mu$ m	1 Km	24 horas	2.250 km	8 bits
	B2	0,61 - 0,68 $\mu$ m				
	B3	0,78 - 0,89 $\mu$ m				
	MIR	1,58 - 1,75 $\mu$ m				

Fonte: adaptado de VITO (2013)

O objetivo geral do sistema VEGETATION consiste em fornecer medições precisas das características básicas das coberturas de vegetação numa base operacional:

- quer para estudos científicos que envolvam experiências à escala regional e global ao longo de períodos de tempo prolongados (por exemplo, desenvolvimento de modelos da dinâmica da biosfera em interação com modelos climáticos),
- quer para sistemas concebidos para monitorizar importantes recursos de vegetação, tais como culturas, pastagens e florestas.

Tabela 3.8 – Radiometria do sensor VEGETATION

<b>Bandas espectrais</b>	<b>Comprimento de onda</b>	<b>Variação da refletância da superfície</b>
<b>Azul</b>	0.43 - 0.47 $\mu\text{m}$	0.0 - 0.5
<b>Vermelho</b>	0.61 - 0.68 $\mu\text{m}$	0.0 - 0.5
<b>NIR</b>	0.78 - 0.89 $\mu\text{m}$	0.0 - 0.7
<b>SWIR</b>	1.58 - 1.75 $\mu\text{m}$	0.0 - 0.6

Fonte: adaptado de VITO (2013)

Foram definidos dois tipos de produtos padrão:

1. Uma síntese diária (VGT-DS), com refletância do solo e NDVI informatizado a partir das refletâncias do solo;
2. Uma síntese correspondente a um período de 10 dias (VGT-PS) de valores máximos de NDVI.

Ambos os produtos padrão são processos globais realizados no terreno que proporcionam uma amostragem geométrica padrão, preservando a resolução de dados em bruto de 1 km.

Há alguns mapas de IAF, a nível global, gerados a partir de imagens deste sensor, como por exemplo os produtos do Geoland2 Biopar:

(<http://www.geoland2.eu/portal/service/ShowServiceInfo.do?serviceId=BB808F80>).



#### 4. INDICES DE VEGETAÇÃO

A disponibilidade de várias bandas espectrais permite a exploração mais eficiente das características espectrais dos alvos, em conjunto com os modos de operação dos diversos sistemas sensores. Quanto mais bandas espectrais dispuserem um sistema sensor, mais informações ele fornecerá. Diversos tipos de agrupamento entre bandas vêm sendo desenvolvidos como as razões simples de normalizações e distâncias no espaço cartesiano e suas variantes, em geral realçam o componente espectral da vegetação e se correlacionam com parâmetros biofísicos da vegetação, como o IAF.

As faixas do vermelho e do infravermelho próximo são mais utilizadas, por conter mais de 90% da variação da resposta espectral da vegetação, portanto, estes índices realçam o comportamento espectral da vegetação correlacionando-os com os parâmetros biofísicos da mesma (Thorp and Tian, 2004).

As técnicas de realce de imagem por meio de índices de vegetação aumentam o brilho das áreas vegetadas, melhorando a aparência da distribuição espacial de informações das imagens, tornando-as de fácil interpretação visual e computacional.

Um dos índices de vegetação mais utilizados tem sido o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), cuja simplicidade e alta sensibilidade à densidade da cobertura vegetal tornaram possível o monitoramento da vegetação em escala global, resultando, até o momento, em mais de 22 anos de dados NDVI obtidos das séries NOAA-AVHRR (Jiang *et al.*, 2008). Embora extremamente útil na estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação, o NDVI apresenta problemas de saturação em áreas densamente vegetadas e não linearidade nas relações com o índice de área foliar (IAF) e com a fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (fAPAR). Para dirimir esses problemas, foi desenvolvido o EVI otimizando o sinal da vegetação, melhorando a sensibilidade de regiões com maiores biomassas e melhorando o monitoramento da vegetação ao passo que reduz influências atmosféricas ([http://tbrs.arizona.edu/cdrom/VI\\_Intro/VI\\_MOD\\_VI.html](http://tbrs.arizona.edu/cdrom/VI_Intro/VI_MOD_VI.html)). Jiang *et al.* (2008) desenvolveram o EVI2. Tal índice foi desenvolvido para sensores que não possui a banda do azul como ASTER e AVHRR. O EVI2 pode ser usado para obter melhores observações da superfície. O desafio em desenvolver tal índice foi melhorar a sensibilidade e linearidade a regiões de alta biomassa (Jiang *et al.*, 2008).

Os índices de vegetação, desenvolvidos ao longo dos anos, são diversos, como por exemplo: SR, PVI, SAVI, RDVI, entre outros.

Contudo, para efeitos do cálculo do IAF os que maior aplicação tem tido são o NDVI, e mais recentemente o EVI e o EVI2.

#### 4.1 NDVI

Entre os índices de vegetação mais citados na literatura consultada, o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) é o mais frequentemente utilizado, inclusive para atividades de monitoriamente global (Wang *et al.*, 2004), este detém a habilidade para minimizar efeitos topográficos ao produzir uma escala linear de medida, possui a propriedade de variar entre -1 a +1 (quanto mais próximo de 1, maior a densidade de cobertura vegetal), o 0 representa valor aproximado para ausência de vegetação, ou seja, representa superfícies não vegetadas (Fonseca and Fernandes, 2004).

O NDVI utiliza a banda do vermelho e do infravermelho, pois a relação entre as refletâncias nestas duas bandas é proporcional à abundância da vegetação. Eles operam contrastando a intensa absorção dos pigmentos de clorofila no vermelho, contra a alta refletância do mesofilo da folha no infravermelho próximo. Esta propriedade permite distinguir com precisão espectros puros de vegetação de outros espectros puros como solo, água e rocha (Thorp and Tian, 2004; Viana *et al.*, 2009).

A equação do NDVI apresenta-se da seguinte forma:

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (10)$$

Onde:

IVP – Infravermelho próximo;

V – Vermelho.

De todos os índices de vegetação, foi o NDVI que recebeu maior aplicabilidade, no entanto, outros índices merecem atenção e estudo. São exemplo os seguintes índices:



## 4.2 EVI

O EVI (Enhanced Vegetation Index) é um NDVI modificado, para minimizar o efeito atmosférico, utiliza a diferença de refletância azul e vermelho como indicador do nível de influência atmosfera, como no ARVI, juntamente com a remoção de sujidade de brilho variações induzidas nas VI como no índice de vegetação do solo ajustada (SAVI). O EVI ainda separa o solo e as influências atmosféricas a partir do sinal de vegetação, incluindo um termo feedback para correção simultânea. A fórmula EVI é escrita como:

$$EVI = G \cdot \frac{PNIR - Pred}{PNIR + C1 \cdot Pred - C2 \cdot Pblue + L} \quad (11)$$

Onde:

Px - refletâncias de superfície total ou parcialmente atmosférica corrigida;

L - ajuste de fundo do povoamento para a correção não-linear, diferencial NIR e transferência radiante vermelho através de um povoamento;

C1 e C2 - coeficientes do termo resistência aerossol (que utiliza a banda de azul para corrigir a influência de aerossóis na faixa vermelha);

G - é um ganho ou fator de escala.

Os coeficientes adotados no algoritmo de EVI são, L = 1, C1 = 6, C2 = 7,5, e G = 2,5.

## 4.3 EVI 2

Jiang *et al.* (2008) desenvolveram um novo índice de vegetação baseado no EVI, denominado EVI2, e que não utiliza a banda azul, cuja equação é apresentada pela equação seguinte:

$$EVI2 = 2,5 [(N-R) / (N + 2,4R + 1)] \quad (12)$$

Onde:

N, R são as Refletâncias de superfície medidas na faixa do infravermelho próximo e do vermelho, respetivamente.

Segundo os autores citados, a banda do azul utilizada no EVI não fornece informações adicionais sobre as propriedades biofísicas da vegetação, tendo a finalidade de reduzir o ruído e as incertezas associadas à alta variabilidade dos aerossóis atmosféricos, razão pela qual o novo índice proposto poderá ser um substituto aceitável para o EVI quando a imagem for de boa qualidade e quando for feita a correção atmosférica.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é o Minho-Lima (Fig. 5.1), sendo uma sub-região estatística portuguesa, parte da Região Norte, corresponde integralmente ao Distrito de Viana do Castelo. É limitada a norte e a leste com a Galiza, a sul com o Cávado e a oeste com o Oceano Atlântico. Desfruta de uma área de 2 255 km<sup>2</sup> e uma população de 244 836 habitantes (INE, 2012).

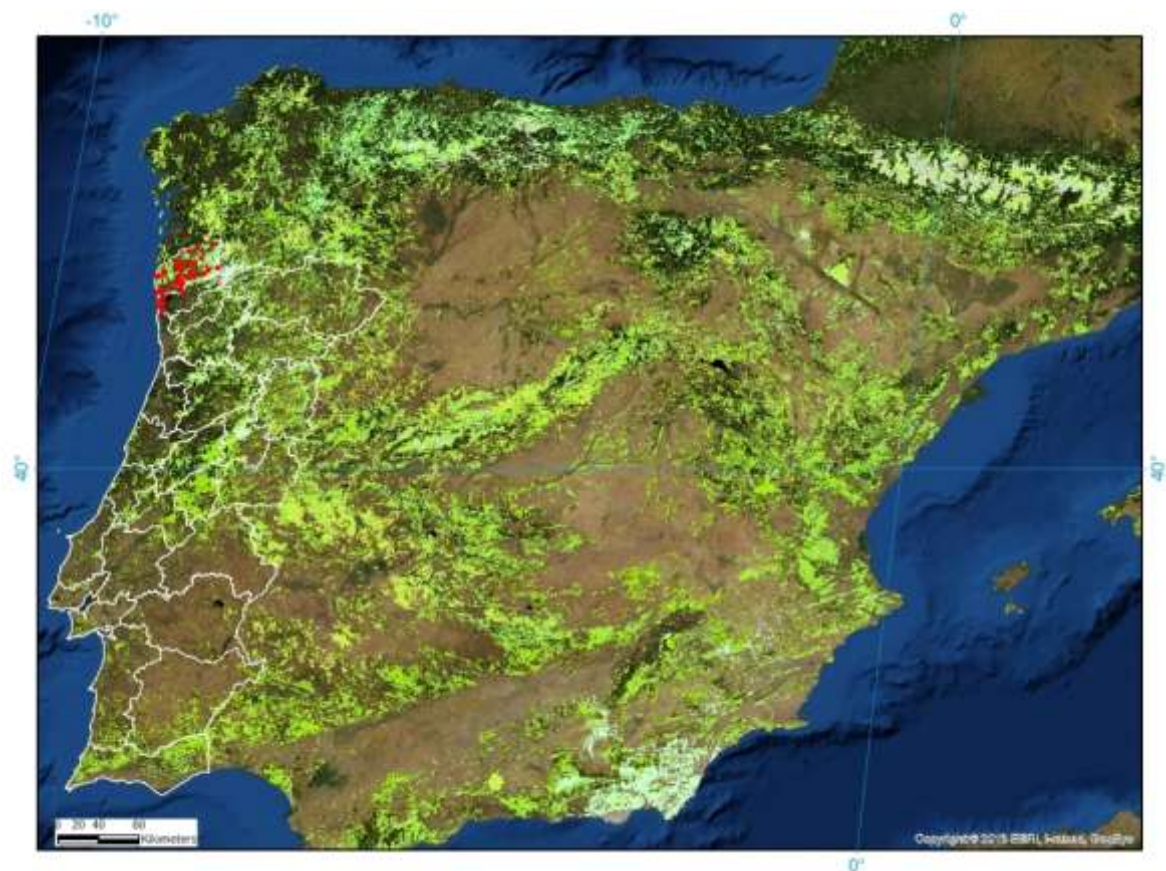


Figura 3.1 - Localização da área de estudo com as parcelas de amostragem

Esta região apresenta uma topografia complexa, uma vez que a maioria dos seus pontos mais altos está situada a leste da região, no qual o seu ponto mais elevado fica na Serra da Pedrada, no concelho de Arcos de Valdevez, com uma altitude de 1416m. Outras serras importantes são as de Arga, Gerês, Peneda, Amarela. Já a oeste onde confina com o Oceano Atlântico tem cotas muito baixas.

A bacia hidrográfica do Rio Minho, no extremo NW da Região Norte, abrange no

território nacional uma área aproximada de 850 km<sup>2</sup>, cerca de 5% do total da bacia. É partilhada por Portugal e Espanha e é composta por 4 sub-bacias no território nacional: Trancoso, Mouro, Gandanha e Coura. O seu curso de água principal, o Rio Minho, tem uma extensão de 70 km, desaguando em Caminha no Oceano Atlântico.

A bacia hidrográfica do Rio Lima ocupa uma área aproximada de 2480 km<sup>2</sup> em território nacional (48% da área total em Portugal). O seu curso de água principal é o Rio Lima que percorre desde a fronteira até à foz em Viana do Castelo cerca de 67 km (Atlas da Água - SNIRH, 2010). Apesar de conter um grande número de sub-bacias, importa salientar as dos seus principais tributários, o Rio Âncora, o Rio Neiva e o Rio Vez.

A variabilidade climática também é acentuada, observando-se precipitações médias anuais superiores a 2000mm para a região, e temperaturas médias anuais são menos contrastadas no Inverno, pois os ventos oceânicos, de origem ocidental, que penetram no território, uniformizam a uma grande escala a temperatura. As diferenças registadas explicam-se pela influência da altitude, latitude e pela ação do agente moderador de temperatura, que é o oceano Atlântico. As temperaturas mínimas do ar, em média, registam-se nas áreas montanhosas da região, como são as serras do Gerês, Peneda, Amarela.

A temperatura mínima do ar, em média é mais moderada junto à fachada litoral da região, nos períodos de duração das vagas de frio. Pode-se registar uma diferença de 10°C entre as estações da fachada litoral e as áreas localizadas mais a este da Região.

Os espaços florestais na região do Alto Minho correspondem a uma considerável área, cerca de 73%, daí não poderem ser um aspeto a menosprezar, pois representam um importante sector da economia da região com um peso determinantemente estratégico.

A maioria destes espaços são denominados por áreas arborizadas – floresta, (34%) que correspondem a terrenos dedicados à atividade florestal, todavia a presença de incultos representa também um valor semelhante (com 33%).

A presença dos improdutivos é significativa, com 5% o que ‘...traduz essencialmente a significativa existência de grandes maciços de afloramentos rochosos, de que se destacam os grandes maciços da Serra de Arga e das Serras da Peneda, Soajo e Gerês, mas também vários núcleos, alguns dos quais, dadas as suas características, são alvo de exploração, constituindo importantes pedreiras.

## 5.2 RECOLHA DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS

Os levantamentos de campo decorreram no mês de Agosto de 2012. Nestas áreas foram instaladas parcelas circulares com 500m<sup>2</sup>, num total de 35 parcelas, localizadas em povoamentos de pinheiro bravo, com uma dimensão superior a 5 hectares, distribuídos aleatoriamente pela região. O centro de cada parcela foi registado por GPS (Global Positioning System).

As variáveis dendrométricas medidas foram o diâmetro à altura do peito (dap, cm); a altura total (h, m); a altura da copa (hcp, m); e o diâmetro médio da copa (dcp, m), obtido por duas medições perpendiculares (N-S e E-W). As variáveis estruturais dos povoamentos foram calculadas para obter as características dos povoamentos: N (árvores ha<sup>-1</sup>); G(m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>); h<sub>dom</sub> (m); d<sub>dom</sub> (m); t (idade); GC% (grau de cobertura do solo) e IQ (índice de qualidade, m), calculado de acordo com (Marques, 1991), para uma idade de referência de 35 anos. O V (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) do tronco, com casca, e a Biomassa total aérea seca (Bt, t ha<sup>-1</sup>), foram calculados de acordo com as Equação 1 (Viana, 2012b) e Equação 2 (Viana, 2012a), respetivamente:

$$v = 0.0001309d^{2,465778}; R^2 = 0.967 \quad (13)$$

$$B_t = W_{fuste} + W_{casca} + W_{bicada} + W_{ramos} + W_{agulhas}; R^2 = 0.987 \quad (14)$$

Sendo:

$$W_{fuste} = \exp [-2.51510 + 2.02707(\ln d) + 0.05050h]$$

$$W_{casca} = \frac{d^2}{11.07610 + 196.9906h^{-1}}$$

$$W_{bicada} = 0.75410 \exp [16.81587d^{-1} - 6.46652h^{-1}]$$

$$W_{ramos} = 0.09558d^{2.65915}h^{-1.11584}$$

$$W_{agulhas} = 0.12551d^{2.15321}h^{-0.74649}$$

## 5.3 MEDIÇÕES INDIRETAS DO IAF COM O CÉPTÓMETRO

A avaliação da radiação intercetada pelo coberto, mais especificamente a Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) foi realizada recorrendo ao método de medição de perfis, no qual se utilizou um ceptómetro (“SunScan Ceptometer-type SS1 - Delta-T Devices”) para a medição da radiação.

O ceptómetro consiste numa vara metálica, de aproximadamente 100 cm de

comprimento, cuja face superior possui um revestimento de células fotossensíveis e num sistema de aquisição de dados.

O ceptómetro foi inserido paralelo ao solo e por baixo das copas, procurando sempre evitar os ramos, e mediu-se a radiação média recebida, realizando-se 5 medições por cada parcela. Estas medições foram feitas durante o mês de agosto num ambiente estável (céu limpo), entre as 11h e as 14h (meio dia solar).

## **5.4 PROCEDIMENTOS DE DETECÇÃO REMOTA**

### **5.4.1 Aquisição e preparação das imagens de satélite**

Neste estudo utilizaram-se dois produtos multiespectrais, proveniente do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Fig. 5.2).

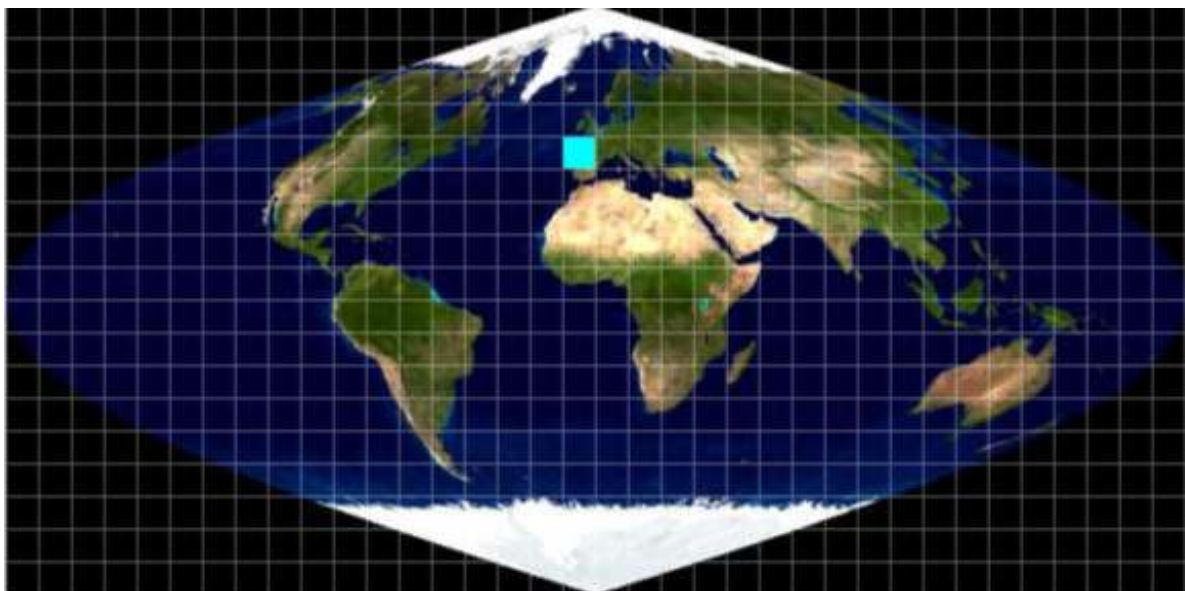


Figura 5.2 - Produto MODIS selecionado para o estudo

Fonte: adaptado de LP DAAC - NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (2001)

Este sensor está a bordo do satélite Terra, tendo um de média resolução (250m), e um de média-alta resolução (30m), proveniente do sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), a bordo do satélite Landsat 7. As imagens foram adquiridas no local web <<https://lpdaac.usgs.gov/>> (LP DAAC - NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, 2001).

As imagens MODIS utilizadas correspondem aos produtos MOD13Q1 (resolução temporal de 16 dias e resolução espacial de 250 metros, na projeção Sinusoidal), que incluem os índices de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o EVI (Enhanced Vegetation Index), geradas pelas bandas de refletância do azul, vermelho e infravermelho, centradas a 469 nanómetros, 645 nanómetros, e 858 nanómetros, respetivamente. A imagem MODIS utilizada (MOD13Q1.A2012225.h17v04.005.2012242054939.hdf) foi registada a 12 de Agosto de 2012, o mais próximo da data de recolha das variáveis de campo, com boas condições atmosféricas.

Outro produto MODIS disponibilizado é o MOD15A2 que inclui o Índice de Área Foliar global (LAI, Leaf Area Index, do inglês) e a Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa (FPAR), combinado a cada 8 dias, com uma resolução espacial de 1 km. A imagem MOD15A2.A2012225.h17v04.005.2012234062256.hdf, de 12 de Agosto de 2012 foi utilizada para comparar com os valores do Índice de área foliar medidos em campo.

As imagens MODIS, originalmente na projeção Sinusoidal (formato HDF-EOS – *Hierarchical Data Format*), foram convertidas com a ferramenta Modis Reprojection Tool (MRT), para a projeção UTM e formato Geotiff e, em seguida, foram importadas para o software de Detecção Remota e SIG Idrisi Andes (Eastman, 2006).

Em virtude da avaria do satélite Landsat 5 TM, que finalizou a recolha de imagens em Maio de 2012, como alternativa foi utilizada uma imagem do Landsat 7 ETM+. Contudo, as imagens do sensor ETM+, recolhidas a partir de 31 de Maio de 2003, apresentam falhas de pixéis em linhas na imagem, por avaria do *Scan Line Corrector* (SLC-off Data) do sensor. Desta forma, a imagem utilizada (LE72040312012177ASN00), de 25 de Junho de 2012, teve que ser corrigida (Gap Filling) antes de ser processada, cujo procedimento como se explica na secção seguinte.

#### **5.4.2 Gap Filling (correção de falhas) das imagens Landsat 7 ETM+**

A avaria ocorrida no *Scan Line Corrector* (SLC) fez com que as imagens Landsat 7 ETM+, recolhidas a partir de Maio de 2003, apresentem falhas, perdendo cerca de 22% da informação (USGS, 2013a). Como tentativa de corrigir este erro nas imagens foram propostos alguns algoritmos para preencher os pixéis “vazios” de informação, pela U.S.

Geological Survey (USGS, 2013b), e por outros autores. Neste trabalho, optou-se por fazer a correção por uma ferramenta de fácil utilização, desenvolvida por (Bustillos, 2012), disponível para ArcGIS (ESRI, 2013). Não obstante da correção implementada, as imagens corrigidas por estes métodos devem ser utilizadas cuidadosamente para fins de investigação. Por outro lado, estas limitações serão brevemente ultrapassadas, uma vez que está prevista para breve a disponibilização das imagens do Landsat 8, recentemente lançado e já em operação.

#### **5.4.3 Processamento da imagem de satélite e criação de Índices de vegetação**

As imagens MOD13Q1, MOD15A2, e Landsat 7 ETM+ foram importadas, individualmente, para o Idrisi (Eastman, 2006), cortadas para a área de estudo, corrigidas geometricamente pelo ajustamento de um polinómio linear, com base em pontos de controlo recolhidos (Toutin, 2004), e introduzidas no sistema de coordenadas Hayford-Gauss, Datum de Lisboa, com falsa origem a Oeste de Sagres. O interpolador utilizado na reamostragem foi o vizinho mais próximo (Lillesand *et al.*, 2004).

Complementarmente aos índices de vegetação NDVI e EVI das imagens MODIS (figuras 5.3 e 5.4) foram criados os índices de vegetação NDVI, EVI e EVI2, com as bandas de refletância do vermelho e infra-vermelho e azul das imagens ETM+ MODIS (figuras 5.5 e 5.6). A escolha destes índices deveu-se ao facto destes serem apresentados, na literatura, como melhor correlacionados com as variáveis biofísicas dos povoamentos, Biomassa, IAF, etc. (Zheng *et al.*, 2007; Jiang *et al.*, 2008; Viana *et al.*, 2009; Viana *et al.*, 2011).



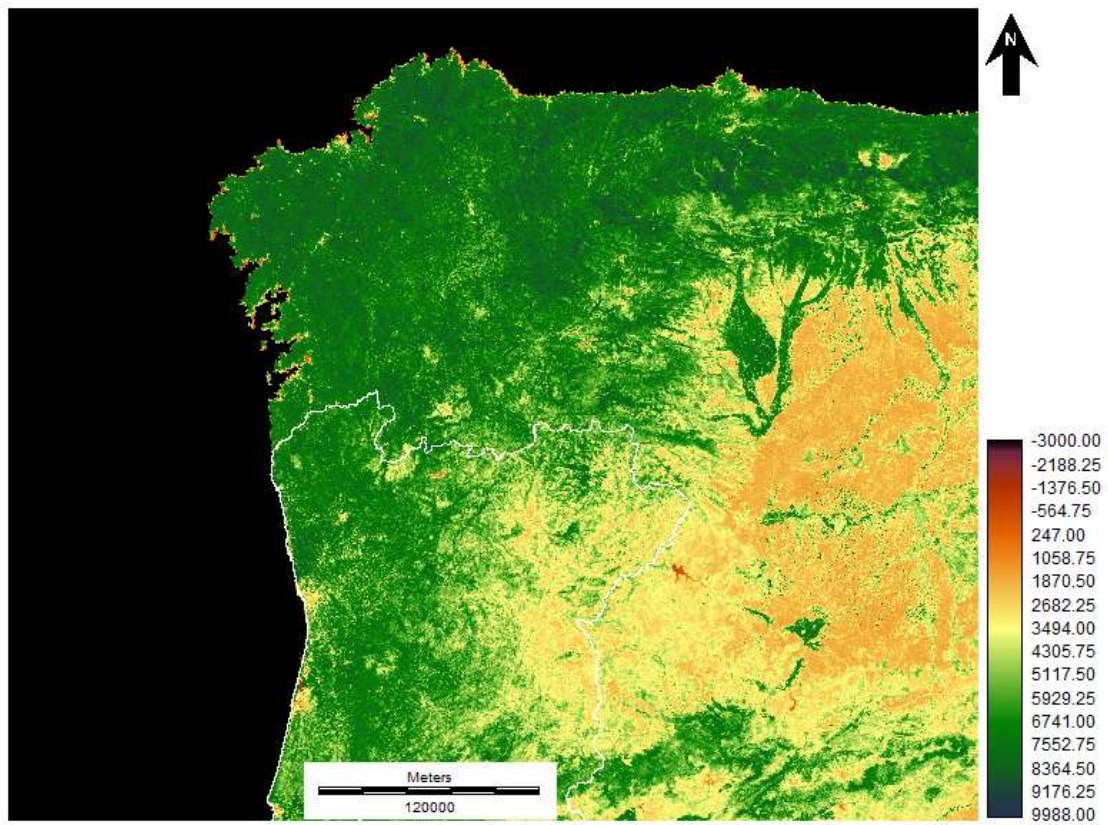


Figura 5.3 - Índice de vegetação normalizada (NDVI) do sensor MODIS

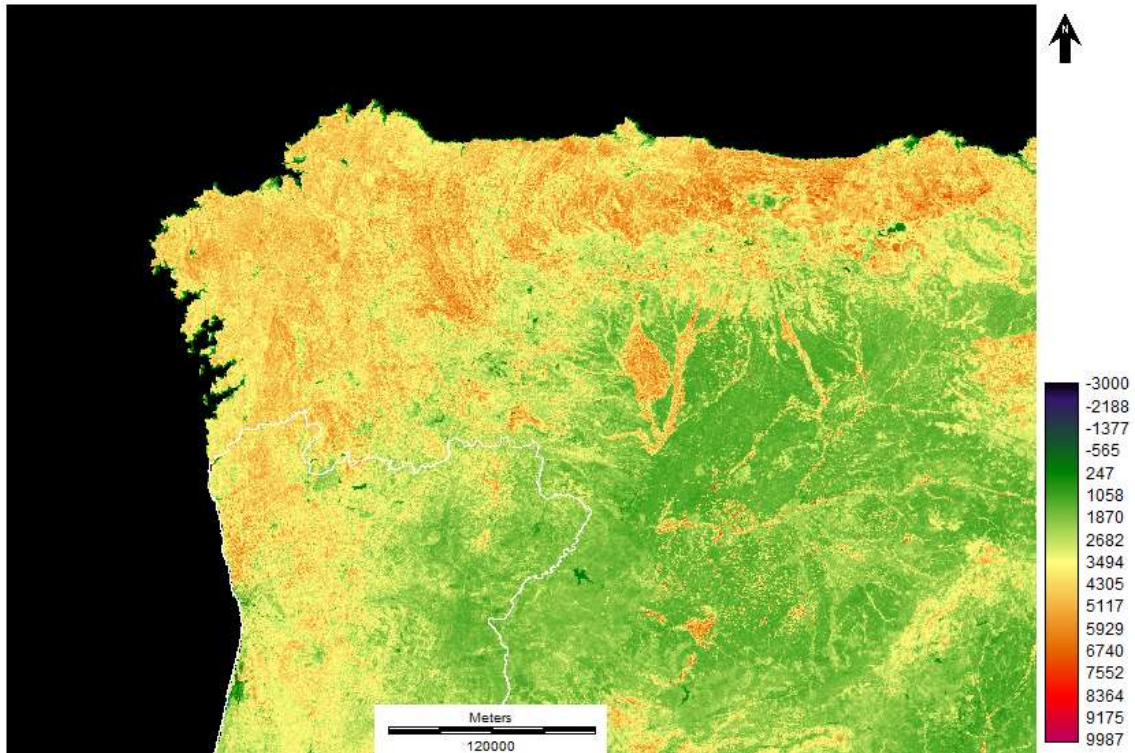


Figura 5.4 - Enhanced Vegetation Index (EVI) do sensor MODIS



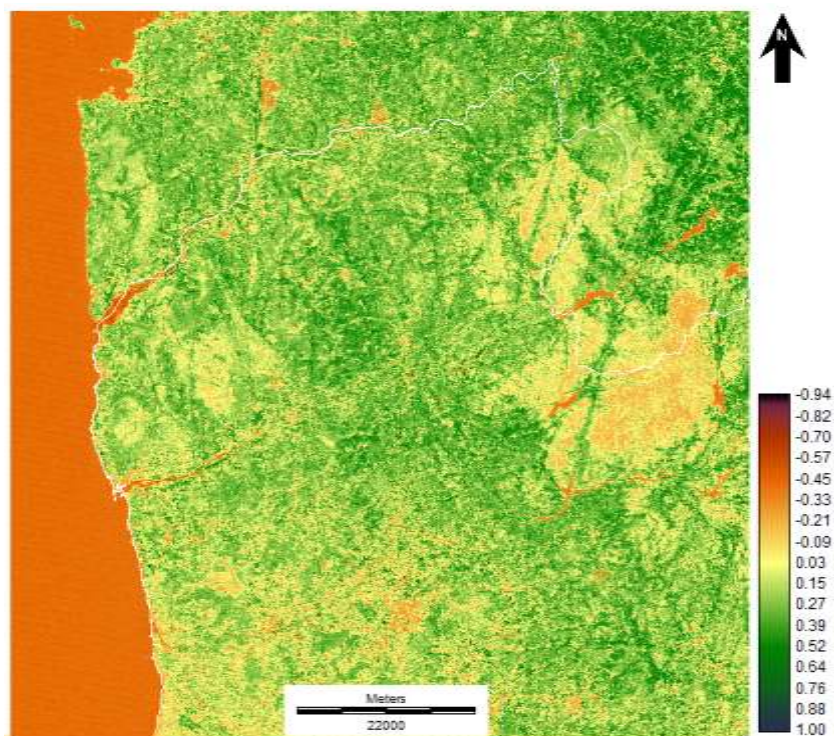


Figura 5.5 - Índice de vegetação normalizada (NDVI) do sensor ETM+

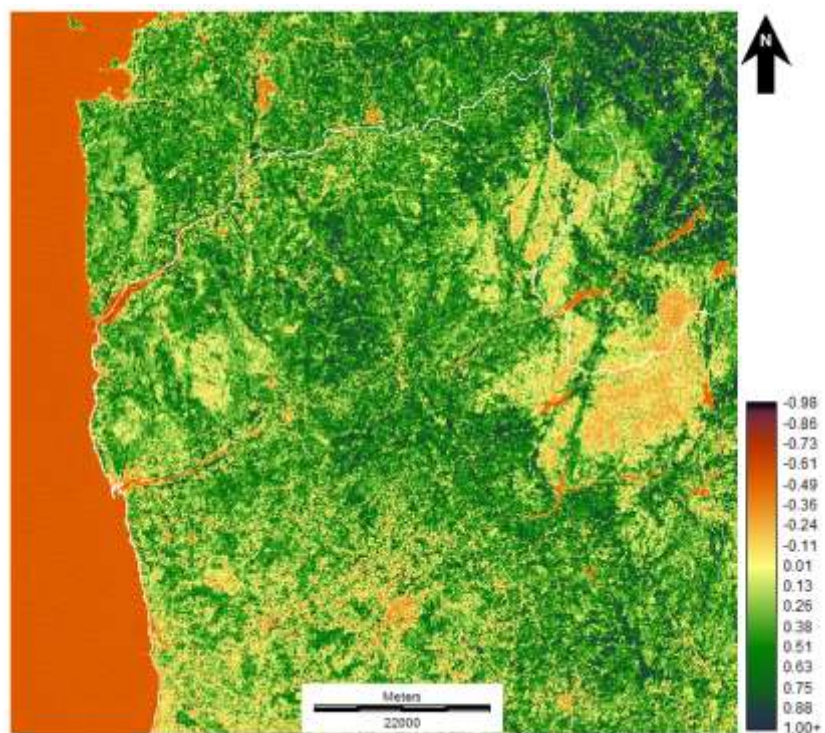


Figura 5.6 - Novo Enhanced Vegetation Index (EVI2) do sensor ETM+

De forma a extrair a informação espectral das imagens, criou-se uma geodatabase no ArcGIS 9.x (ESRI, 2013) com a informação raster, e o ficheiro vetorial de pontos com o centro das parcelas de pinheiro-bravo amostradas, com o registo das variáveis de campo, georreferenciados no mesmo sistema de coordenadas. Nas imagens ETM+, para além de se extraírem os valores individuais de cada pixel, onde se localizava o centro da parcela (30m x 30m), extraiu-se, adicionalmente, a informação dos pixéis vizinhos (90m x 90m), pelo método da interpolação bilinear.

## 5.5 AJUSTAMENTO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE REGRESSÃO

As variáveis recolhidas em campo e a informação espectral (valores de refletância das bandas individuais das imagens MODIS e ETM+ e Índices de Vegetação) foram avaliadas pela correlação de Pearson. As variáveis melhores correlacionadas com o IAF foram utilizadas, individualmente ou combinadas, para ajustar equações de regressão, como variáveis independentes, tendo o IAF como variável dependente. Foram também ajustadas equações de regressão tendo como variáveis dependentes:  $G(m^2 ha^{-1})$ ,  $V(m^3 ha^{-1})$  e  $Bt(t ha^{-1})$  e variável independente o IAF recolhido em campo.

Foram ajustados vários modelos de regressão (e.g. Zianis *et al.*, 2005), pelo método dos mínimos quadrados, e calculadas as estatísticas do ajustamento, que serviram para avaliar e comparar os diferentes modelos. Os modelos não lineares foram linearizados por logaritmização para o ajustamento, de forma a eliminar a heterocedasticidade dos resíduos (Parresol, 1999; Viana, 2012a). Após calcular os valores dos resíduos de cada equação ajustada  $e_i = (y_i - \hat{y}_i)$  (diferença entre os valores observados e os valores estimados) e analisar a sua dispersão gráfica, foram calculados e comparados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), Erro médio absoluto (EMA), valor percentual do erro médio absoluto (EMA%), erro quadrático médio (EQM), desvio padrão dos resíduos ( $s_{yx}$ ), valor percentual do desvio padrão dos resíduos ( $s_{yx}\%$ ), e o Índice de Furnival (FI) para seleção do melhor modelo, de acordo com as Eqs (15-20) (Viana, 2012a):

$$EMA = \frac{\sum_1^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (15)$$

$$EQM = \frac{\sum_1^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p} \quad (16)$$

$$s_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}} \quad (17)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_1^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (18)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \left[ (1 - R^2) \frac{n-1}{n-p} \right] \quad (18)$$

$$FI = \sqrt{EQM} \left( \frac{1}{\text{Média Geométrica}(y^{-1})} \right) \quad (20)$$

Onde:  $y_i$  é o valor observado e;  $\hat{y}_i$  é o valor estimado para cada observação  $i$ ;  $\bar{y}$  é a média dos valores observados;  $n$  é o número de observações e  $p$  é o número de parâmetros do modelo.

As equações desenvolvidas no presente trabalho para estimativa do IAF ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) foram comparadas com outros modelos para determinar o IAF, em povoamentos de pinheiro bravo, previamente estabelecidos por outros autores (Aranha, 1998; Porté *et al.*, 2000; Lopes, 2005), utilizando como regressores, as variáveis dos povoamentos, como G ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ), V ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ), Acp ( $\text{m}^2$  por árvore), e modelos que utilizam como regressores características espectrais extraídas de imagens de satélite, como as bandas de refletância do vermelho e do infravermelho próximo, e índices de vegetação, com ênfase para o NDVI, como são os modelos de Aranha (1998):

$$IAF = 5,746NDVI^{0,717}, (R^2=0,291*, n=40 \text{ e } EQM=0,42 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}) \quad (21)$$

$$IAF = 3,772VERM^{-0,559}, (R^2=0,362*, n=40 \text{ e } EQM=0,41 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}) \quad (22)$$

$$IAF = 7,915IVP^{-0,559}, (R^2=0,235*, n=40 \text{ e } EQM=0,44 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}) \quad (23)$$

Adicionalmente apresenta-se uma comparação com as estimativas, obtidas pelas relações estabelecidas por Nemani and Running (1989) entre o IAF e o NDVI, para povoamentos de coníferas, extraído de imagens Landsat TM e imagens espectrais do Advanced Very High Resolution Radiometer – AVHRR/NOAA:

$$NDVI_{TM} = Ln\left(\frac{IAF}{0,64}\right) + 0,31, (R^2=0,58, EQM=0,04) \quad (24)$$

$$NDVI_{AVHRR} = Ln\left(\frac{IAF}{0,65}\right) + 0,34, (R^2=0,88, EQM=0,03) \quad (25)$$

Por fim, a estimativas produzidas pelos modelos desenvolvidos foram comparadas com os produtos MOD15A2, que apresentam o mapeamento do Índice de Área Foliar global, a uma resolução de 1km x 1Km.



## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 CARACTERÍSTICAS DOS POVOAMENTOS DE PINHEIR-BRAVO

As estatísticas descritivas das características estruturais recolhidas nos 35 povoamentos de pinheiro bravo são apresentadas na tabela 6.1.

Tabela 6.1- Estatísticas descritivas das características estruturais dos povoamentos de pinheiro bravo

	<b>N</b>	<b>t</b>	<b>d</b>	<b>h<sub>dom</sub></b>	<b>G</b>	<b>V</b>	<b>B<sub>t</sub></b>	<b>IQ</b>	<b>AMA</b>		<b>IAF</b>
	(ár <sub>v</sub> ha <sup>-1</sup> )	(anos)	(cm)	(m)	(m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	(m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	(t ha <sup>-1</sup> )	(m)	(m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	<b>FW</b>	(m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> )
Média	789	36	29.0	15.1	47.7	308.4	198.2	15.5	8.6	0.27	2.80
Máximo	2360	53	47.0	21.5	87.6	530.4	322.2	20.8	18.3	0.75	3.85
Mínima	260	26	15.8	8.3	20.0	107.9	62.6	9.4	3.8	0.19	0.92
Desvio padrão	479	7	8.5	3.8	16.4	114.2	69.6	3.0	3.1	0.10	0.73

onde: *N* é o número de árvores por hectare; *t* é a idade média dos povoamentos; *d* é o diâmetro à altura do peito médio; *h<sub>dom</sub>* é a altura dominante; *G* é a área basal; *V* é o volume comercial; *B<sub>t</sub>* é a biomassa aérea total; *IQ* é o índice de qualidade; *AMA* é o acréscimo médio anual; *FW* é o fator de espaçamento de Wilson; e *IAF* é o índice de área foliar.

### 6.2 CORRELAÇÃO ENTRE O IAF AS VARIÁVEIS DOS POVOAMENTOS E AS CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS

A correlação de Pearson levada a cabo entre o IAF e as variáveis dendrométricas e as variáveis estruturais dos povoamentos é apresentada na tabela 6.2. Na tabela 6.3 apresenta-se a correlação existente entre o IAF e a informação espectral extraídas das imagens espectrais Landsat ETM+ e MODIS.

Tabela 6.2 - Correlação entre o IAF e as variáveis estruturais dos povoamentos de pinheiro bravo

		<i>dap</i>	<i>h</i>	<i>hdom</i>	<i>dcopa</i>	<i>Área copa</i>	<i>N</i>	<i>GC</i>	<i>G</i>	<i>t</i>	<i>tdom</i>	<i>SI</i>	<i>AMA</i>	<i>VOL</i>	<i>Bt</i>
	<i>IAF</i>	(cm)	(m)	(m)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(arv/ha)	%	(m <sup>2</sup> /ha)	(anos)	(anos)	(m)	(m <sup>3</sup> /ha/ano)	m <sup>3</sup> /ha)	(t/ha)
IAF	1														
dap	0.392	1													
h	0.204	0.826	1												
hdom	0.185	0.457	0.746	1											
dcopa	0.460	0.944	0.769	0.404	1										
Área copa	0.406	0.929	0.704	0.304	0.985	1									
N	0.148	-0.660	-0.733	-0.564	-0.671	-0.637	1								
GC	0.880	0.312	0.125	0.025	0.406	0.382	0.299	1							
G	0.737	0.320	0.115	0.051	0.210	0.183	0.396	0.775	1						
t	0.371	0.880	0.709	0.329	0.820	0.810	-0.532	0.332	0.302	1					
tdom	0.426	0.832	0.694	0.412	0.784	0.783	-0.503	0.385	0.342	0.867	1				
SI	-0.070	0.143	0.537	0.865	0.106	0.011	-0.447	-0.228	-0.171	-0.071	0.049	1			
AMA	0.691	0.210	0.034	0.040	0.110	0.076	0.418	0.703	0.955	0.089	0.202	-0.078	1		
VOL	0.747	0.598	0.370	0.212	0.484	0.456	0.090	0.747	0.945	0.546	0.588	-0.083	0.878	1	
Bt	0.757	0.559	0.369	0.216	0.451	0.420	0.140	0.775	0.946	0.531	0.539	-0.083	0.861	0.979	1

Tabela 6.3 - Correlação entre o IAF e a informação espectral extraída nas imagens MODIS e Landsat 7 ETM+

		<i>MOD</i>	<i>MOD</i>	<i>MOD</i>	<i>MOD</i>	<i>MOD</i>	<i>L7</i>	<i>L7</i>	<i>L7</i>	<i>L7</i>	<i>L7</i>	<i>L7</i>	<i>L7</i>	<i>L7</i>
	<i>IAF</i>	<i>R</i>	<i>NIR</i>	<i>MIR</i>	<i>NDVI</i>	<i>EVI</i>	<i>R</i>	<i>NIR</i>	<i>NDVI</i>	<i>SR</i>	<i>EVI</i>	<i>EVI2</i>	<i>NDVI90</i>	<i>EVI290</i>
IAF	1													
MOD R	0.090	1												
MOD NIR	0.149	0.355	1											
MOD MIR	0.009	0.850	0.365	1										
MOD NDVI	-0.073	-0.935	-0.037	-0.800	1									
MOD EVI	0.036	-0.535	0.592	-0.339	0.758	1								
L7 R	0.395	-0.055	-0.142	0.066	0.011	-0.047	1							
L7 NIR	-0.096	-0.219	0.380	-0.092	0.331	0.571	0.307	1						
L7 NDVI	-0.354	-0.249	0.344	-0.324	0.366	0.495	-0.533	0.523	1					
L7 SR	-0.315	-0.234	0.408	-0.285	0.365	0.545	-0.504	0.552	0.987	1				
L7 EVI	-0.302	0.163	-0.143	0.213	-0.203	-0.242	0.510	-0.233	-0.811	-0.832	1			
L7 EVI2	-0.369	-0.230	0.395	-0.245	0.369	0.539	-0.524	0.535	0.999	0.994	-0.820	1		
L7 NDVI90	-0.363	-0.289	0.347	-0.335	0.414	0.536	-0.508	0.532	0.982	0.973	-0.811	0.973	1	
L7 EVI290	-0.351	-0.284	0.367	-0.324	0.415	0.553	-0.499	0.544	0.980	0.981	-0.819	0.975	0.998	1



Como se observa na tabela 6.2 o IAF encontra-se melhor correlacionado com a percentagem de cobertura do solo (GC),  $R=0,88$ ; com o volume comercial (V),  $R=0,75$ ; com a área basal (G),  $R=0,74$  e com a biomassa aérea total ( $B_t$ ),  $R=0,76$ . Contudo, observam-se moderadas correlações com outras variáveis como o acréscimo médio anual (AMA),  $R=0,69$ ; O diâmetro médio das copas ( $d_{copa}$ ),  $R=0,46$ ; a área de copa,  $R=0,41$ ; a idade dominante ( $t_{dom}$ ),  $R=0,43$  ou a idade média ( $t$ ),  $R=0,37$ .

Analisando as correlações entre o IAF e a informação espectral das imagens MODIS e ETM+ (tabela 6.3) constata-se apenas algumas correlações, moderadas, como é o caso da Banda ETM+ do vermelho (L7 R),  $R=0,395$  e da Banda MODIS do Infravermelho próximo (MOD NIR),  $R=0,15$ . Os Índices de Vegetação (IV), calculados com as bandas do ETM+: Simple ratio (L7 SR), NDVI, EVI e EVI2 apresentam correlações negativas, baixas a moderadas, fruto da correlação inexistente que se observou com a banda do infravermelho próximo (L7 NIR),  $R= -0,096$ . Os IV das imagens MODIS não apresentaram qualquer correlação, o que se explica pela baixa resolução destas imagens (250mx250m), que apresentam nos pixéis localizados em cada parcela de amostragem, para além da informação desse povoamento das classes de cobertura de solo vizinhas. Embora estes resultados não surpreendam, seria de esperar que as correlações com as imagens ETM+ conduzissem a melhores resultados. A correção das falhas existentes nas imagens originais (gap filling), sendo uma interpolação dos valores de pixéis vizinhos, para preencher os valores em falta, poderia explicar a baixa correlação encontrada, contudo, apenas 6 parcelas caíram em linhas de pixéis corrigidos, que mesmo não consideradas não melhoram os resultados. Desta forma, a baixa heterogeneidade dos povoamentos de pinheiro bravo, com idades entre os 23 e os 53 anos (tabela 6.1), poderá explicar as alterações pouco sensíveis no comportamento espectral dos povoamentos. Acompanhando os estudos de (Aranha, 1998), (Castro, 2004) e (Lopes, 2005), observa-se que as correlações apresentadas entre o IAF e as características espectrais, em particular os Índices de vegetação, em povoamentos de pinheiro bravo, são também moderadas.

### 6.3 ESTABELECIMENTO DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO

As equações de regressão para predição do IAF foram estabelecidas apenas com as melhores variáveis com base nas estatísticas do ajustamento que se apresentam na tabela 6.4).

Tabela 6.4 - Estatísticas do ajustamento das equações para estimar o IAF

Modelo	Média	EMA	EQM	S <sub>yx</sub>	EMA (%)	S <sub>yx</sub> (%)	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	FI
$IAF = \beta_0 + \beta_1 \ln G$	2.8	0.34	0.19	0.44	12.2	15.7	0.694	0.685	0.415
$IAF = \beta_0 + \beta_1 \ln V$	2.8	0.37	0.19	0.44	13.1	15.7	0.646	0.635	0.440
$IAF = \beta_0 + \beta_1 \ln Bt$	2.8	0.36	0.19	0.44	12.7	15.7	0.647	0.637	0.439
$IAF = \beta_0 + \beta_1 \ln(Acp.N/100)$	2.8	0.20	0.07	0.26	7.2	9.4	0.874	0.870	0.262

Nota: Média, EMA, EQM, Syx e FI com unidades (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>)

As equações ajustadas para estimar o IAF e respetivos coeficientes são:

$$IAF = -3.83242 + 1.75124 \ln G \quad (26)$$

$$IAF = -4.71586 + 1.33095 \ln V \quad (27)$$

$$IAF = -4.54217 + 1.40832 \ln Bt \quad (28)$$

$$IAF = -4.52047 + 1.79093 \ln(Acp.N/100) \quad (29)$$

Nas figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 apresentam-se as equações do IAF ajustadas em função das variáveis independentes no eixo dos x, onde se pode ver a dispersão das observações.

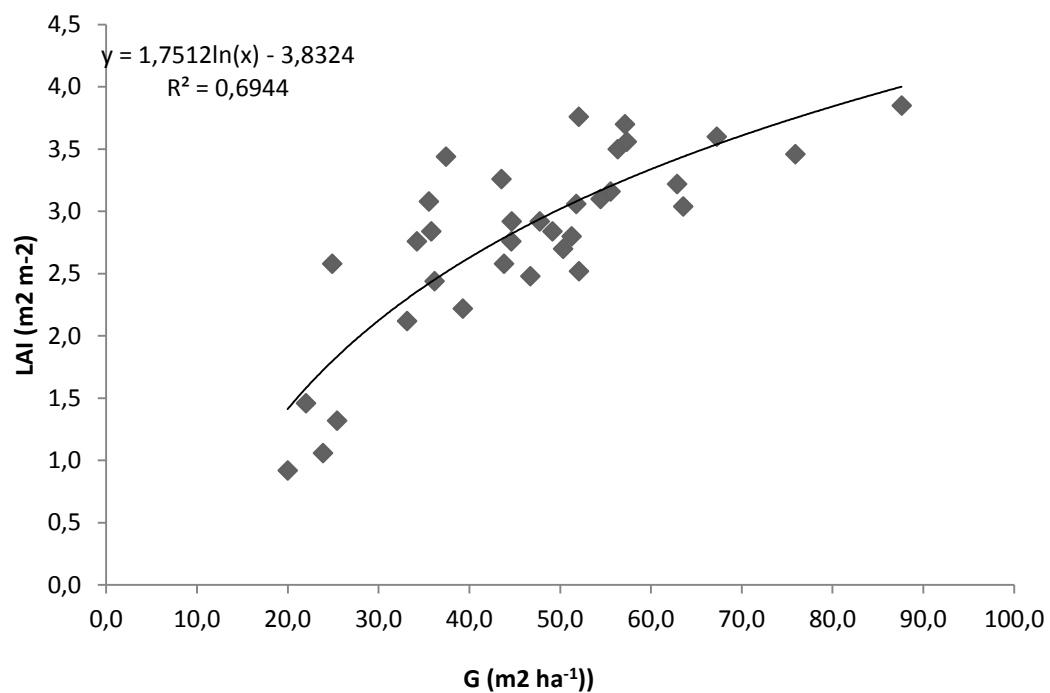


Figura 6.1 - Gráfico de dispersão dos valores de IAF em função da área basal (G)

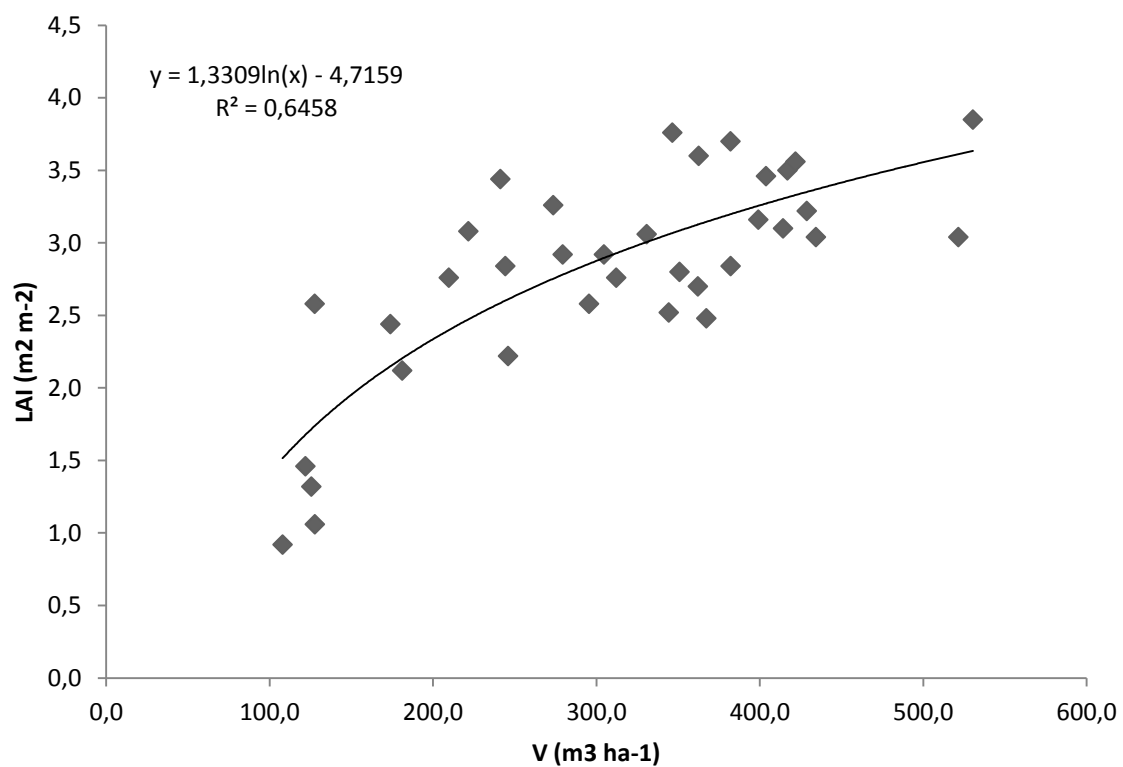


Figura 6.2 - Gráfico de dispersão dos valores de IAF em função do volume (V)

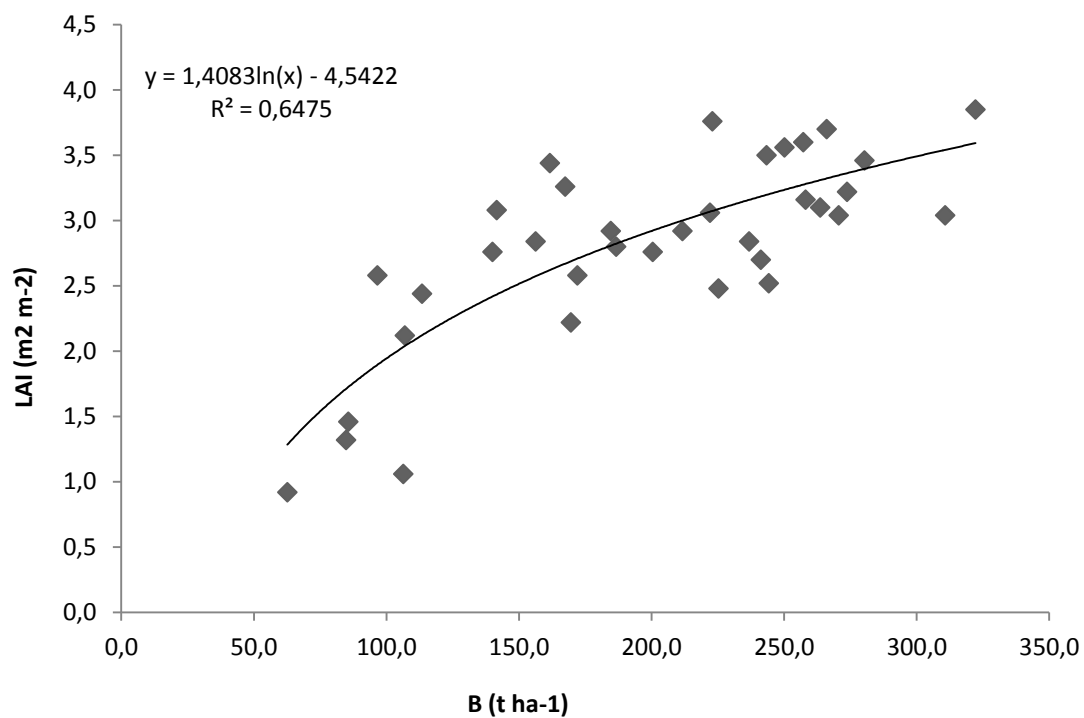


Figura 6.3 - Gráfico de dispersão dos valores de IAF em função da biomassa aérea total (G)

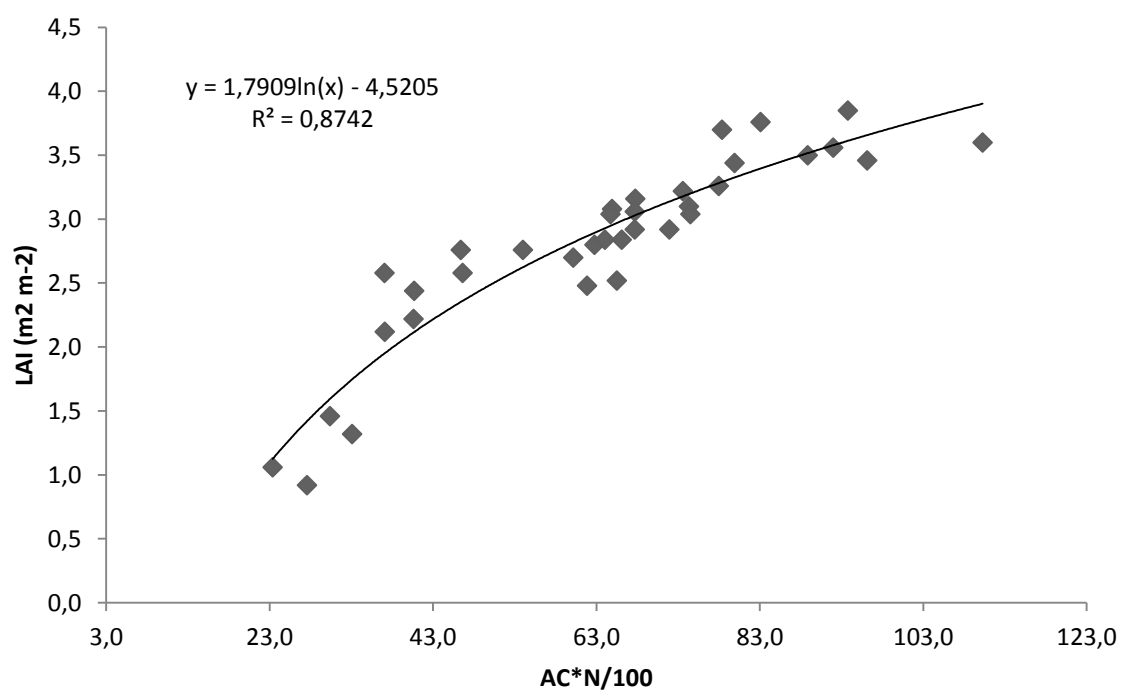


Figura 6.4 - Gráfico de dispersão dos valores de IAF em função da variável combinada, área da copa e número de árvores por hectare.

As discrepâncias entre os valores de IAF observados e os estimados pelas quatro equações desenvolvidas, com as variáveis G, V, Bt e ACnN/100, são apresentados na figura 6.5 (a, b, c e d), respetivamente. Como se observa, os modelos mostram um bom desempenho, confirmando as estatísticas dos ajustamentos apresentadas na tabela 6.5.

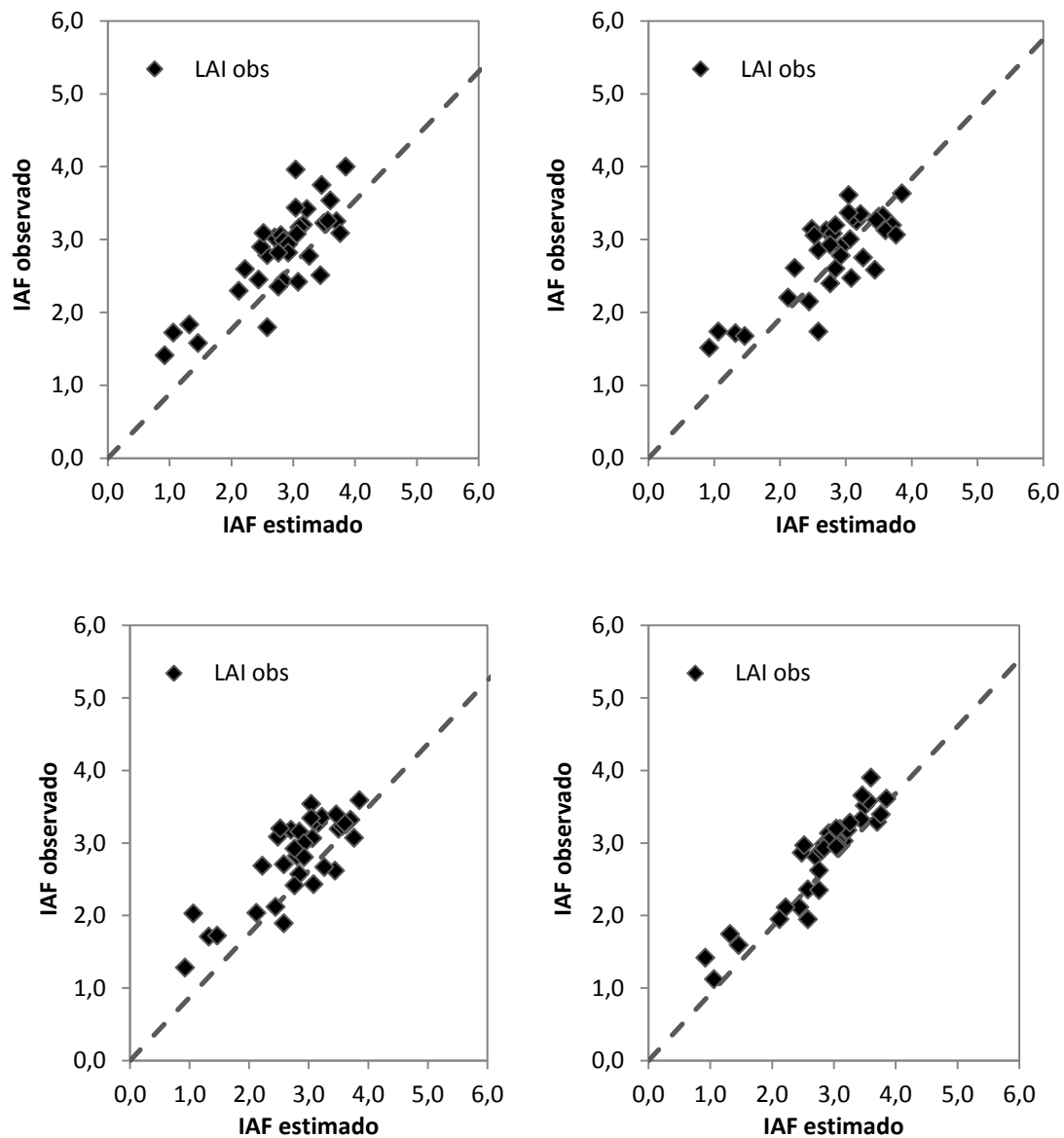


Figura 6.5 - Gráfico de dispersão entre os valores de IAF observados e estimados

De forma a disponibilizar um conjunto de equações para estimar a Área basal (G, m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>), o Volume (V, m<sup>3</sup> há<sup>-1</sup>) e a Biomassa total aérea (Bt, T ha<sup>-1</sup>), a partir apenas do IAF (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>), estabeleceram-se as seguintes equações, cujas estatísticas de ajustamento

e coeficientes dos parâmetros dos modelos se apresentam na tabela 6.5. Os gráficos da dispersão dos valores observados entre as variáveis dependentes e o IAF são apresentados nas figuras 6.6, 6.7 e 6.8.

Tabela 6.5 - Equações ajustadas para estimar G, V e Bt e estatísticas do ajustamento

Modelo	Média	EMA	EQM	S <sub>yx</sub>	EMA (%)	S <sub>yx</sub> (%)	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	FI
$G = 14.5286IAF^{0.39653}$	46.89	7.92	125.96	11.22	16.6	23.5	0.694	0.685	9.8
$V = 72.8825IAF^{0.48524}$	310.4	61.4	6396.0	79.97	19.9	25.9	0.646	0.635	11.9
$Bt = 50.7357IAF^{0.45975}$	199.4	37.8	2256.1	47.50	19.1	24.0	0.648	0.637	11.3

Nota: Média, EMA, EQM, S<sub>yx</sub> e FI com unidades (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>)

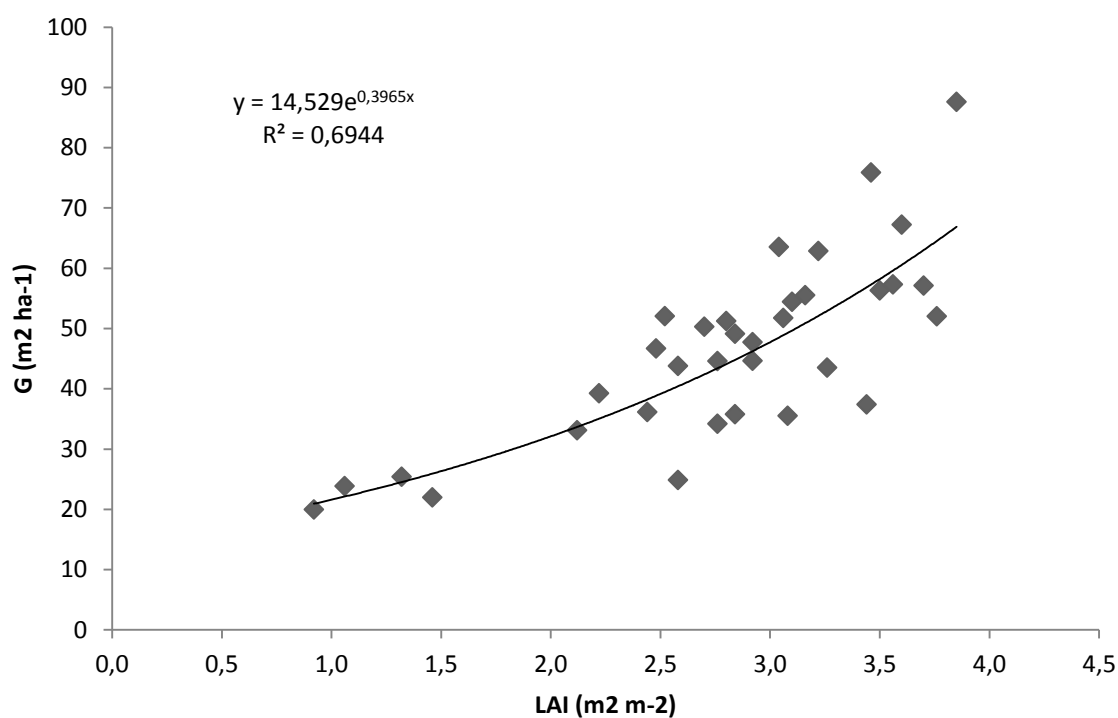


Figura 6.6 - Gráfico de dispersão dos valores da área basal (G) em função do IAF

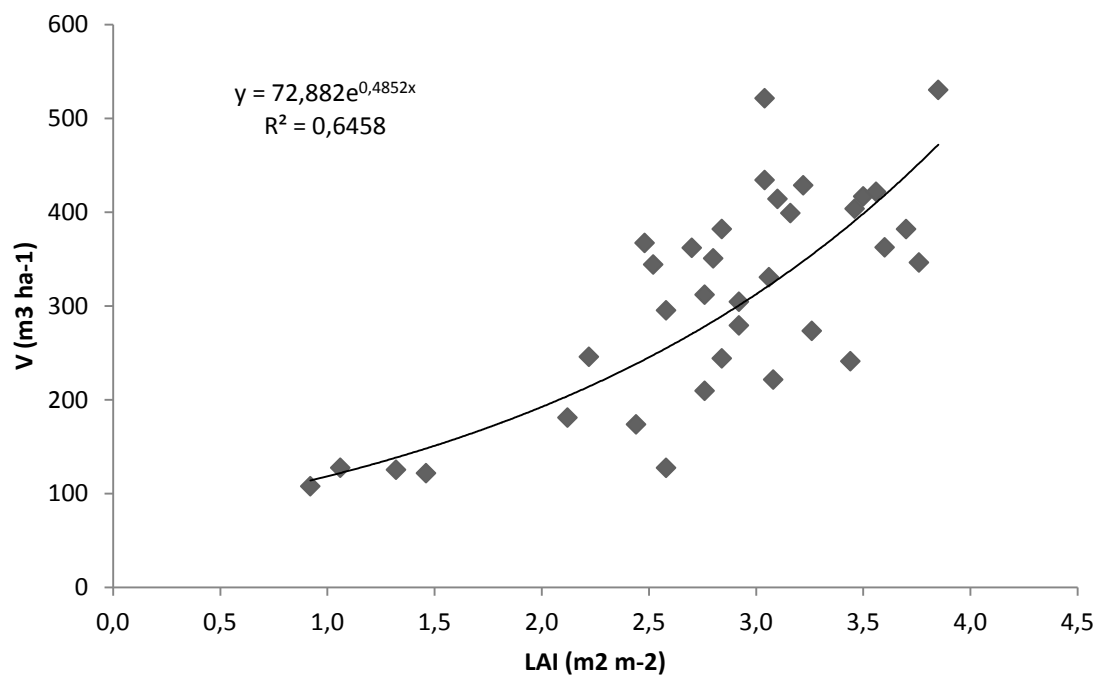


Figura 6.7 - Gráfico de dispersão dos valores do volume (G) em função do IAF

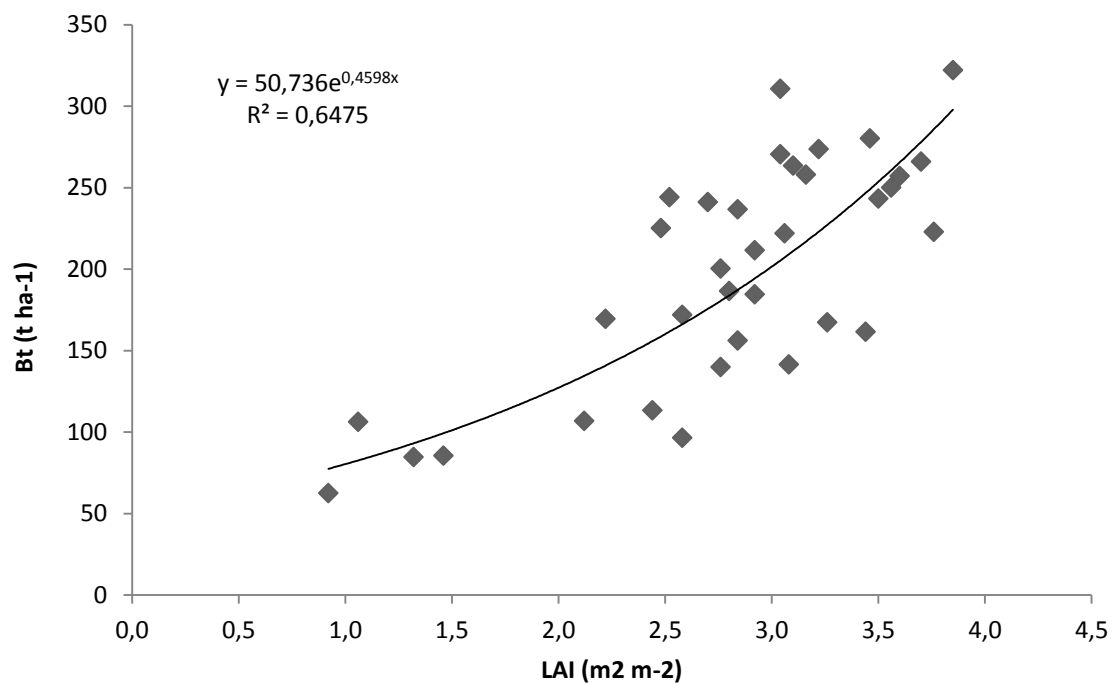


Figura 6.8 - Gráfico de dispersão dos valores da Biomassa aérea total em função do IAF

As discrepâncias entre os valores observados e os estimados pelas equações desenvolvidas são apresentados na figura 6.9 (a, b e c). Como se observa, os modelos mostram um bom desempenho, confirmando as estatísticas dos ajustamentos apresentadas na tabela 6.5.

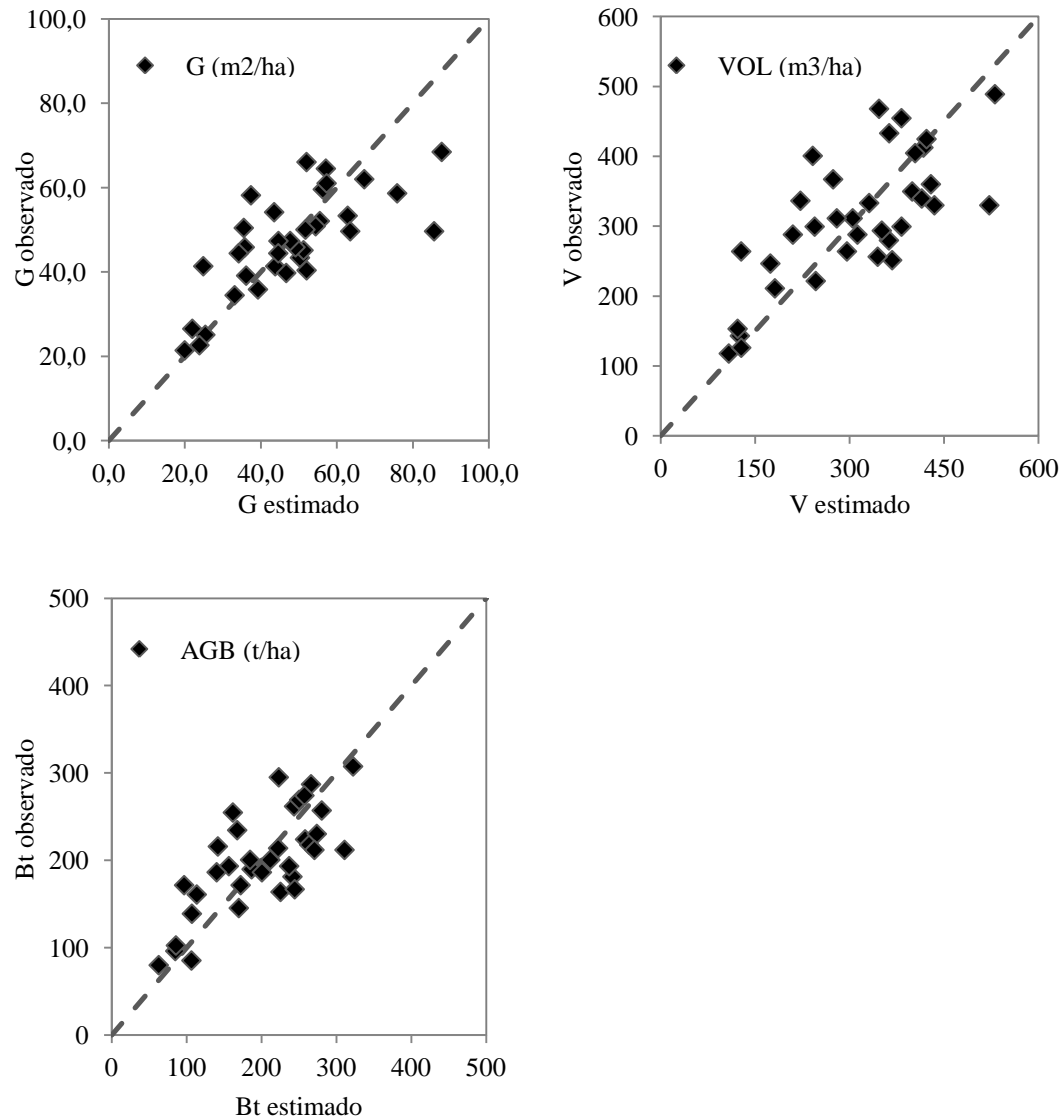


Figura 6.9 - Gráfico de dispersão entre os valores observados e estimados



## 6.4 COMPARAÇÃO ENTRE O IAF E EQUAÇÕES PROPOSTAS POR OUTROS AUTORES

Os modelos desenvolvidos foram comparados com os ajustados por outros autores. Na figura 6.10 apresenta-se a dispersão entre o IAF observado e o IAF estimado pelas equações de Nemani and Running (1989), Aranha (1998), Porté *et al.* (2000) e (Lopes, 2005). Na figura 6.10, apresenta-se o modelo com melhor desempenho nos nossos dados Porté *et al.* (2000), comparado com os modelos desenvolvidos neste estudo.

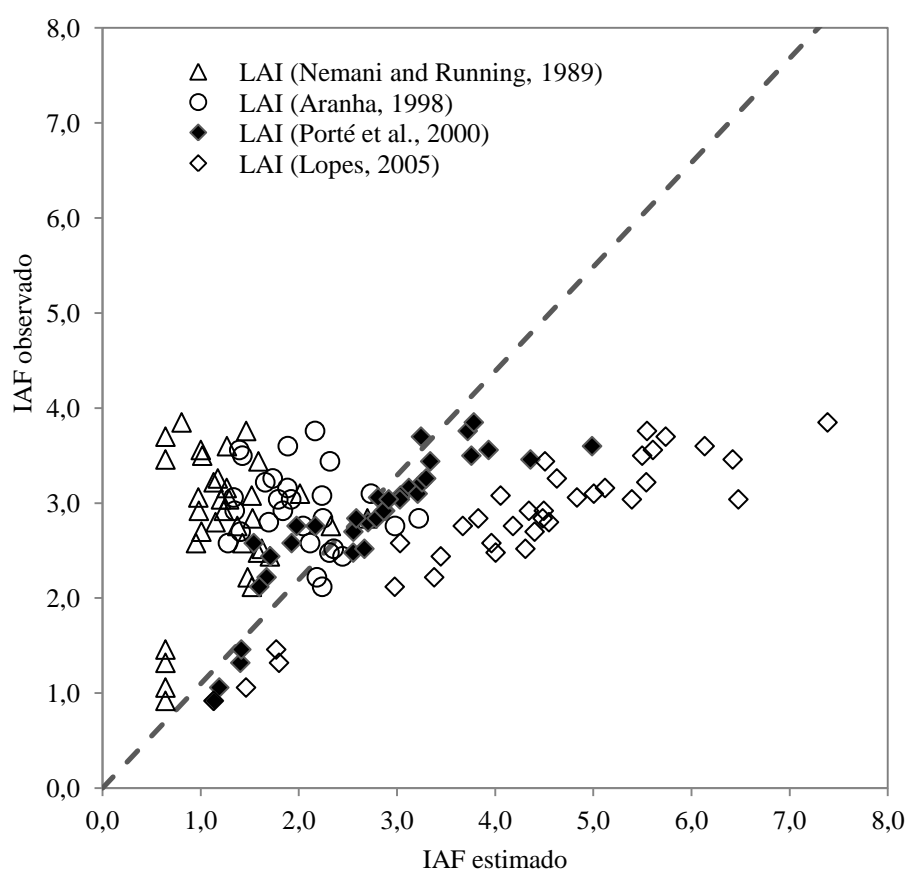


Figura 6.10 - Comparação de dispersão entre o IAF observados e estimados por equações de outros autores

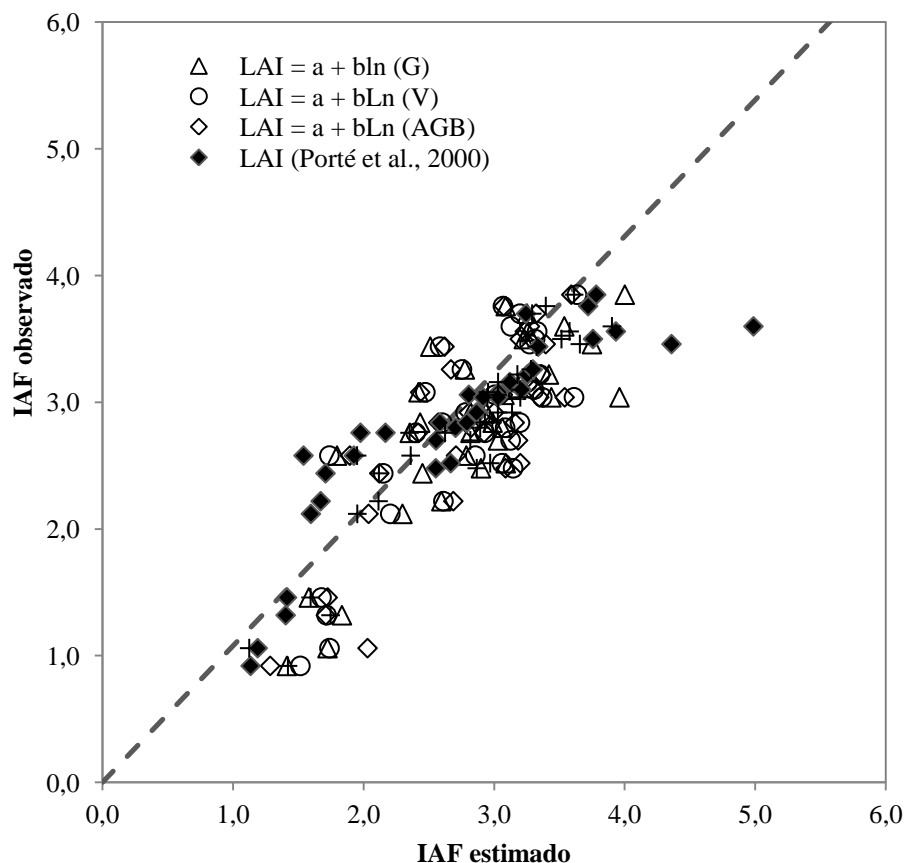


Figura 6.11 - Comparação de dispersão entre o IAF observados e estimados pelas equações desenvolvidas e o modelo de Porté *et al.*, 2000.

Na tabela 6.6 apresentam-se as estatísticas das equações para estimativa do IAF, dos autores citados, quando aplicadas aos dados deste estudo. Como observado nas figuras anteriores. A equação de Porté *et al.*, 2000 é aquela que tem melhor desempenho com um desvio padrão dos resíduos,  $S_{yx} = 16\%$ .

Tabela 6.6 - Estatísticas do ajustamento das equações para estimar o IAF

	Média	EMA	EQM	$S_{yx}$	EMA (%)	$S_{yx}$ (%)
IAF (Porté <i>et al.</i> , 2000)	2.7	0.3	0.20	0.45	10.7	16.0
IAF (Lopes, 2005)	4.4	1.6	3.11	1.76	56.1	62.9
IAF (Nemani and Running, 1989)	1.3	1.5	2.99	1.73	55.0	61.7
IAF (Aranha, 1998)	1.6	1.2	2.42	1.56	44.2	55.5

Nota: Média, EMA, EQM,  $S_{yx}$  com unidades ( $m^2 m^{-2}$ )

## 6.5 COMPARAÇÃO ENTRE O IAF E O IAF DAS IMAGENS MODIS

De forma a avaliar o produto MOD15A2 que inclui o Índice de Área Foliar global (1km x 1km) (figura 6.12), os valores dos pixéis sobrepostos em cada parcela de amostragem, foram extraídos e comparados com as medições do IAF, em campo com o ceptómetro (figura 6.13).

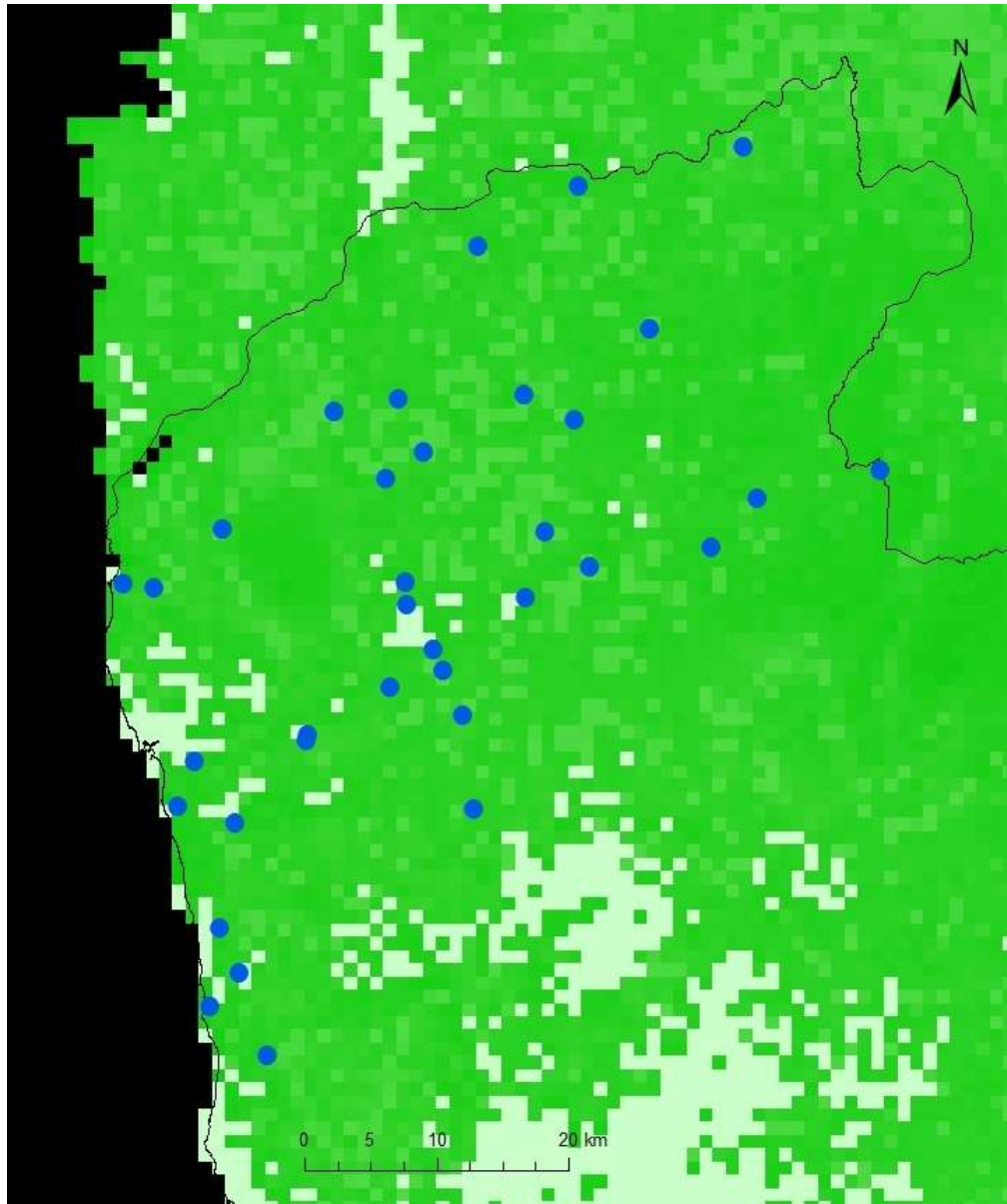


Figura 6.12 - Índice de Área Foliar MODIS, com sobreposição das parcelas de amostragem

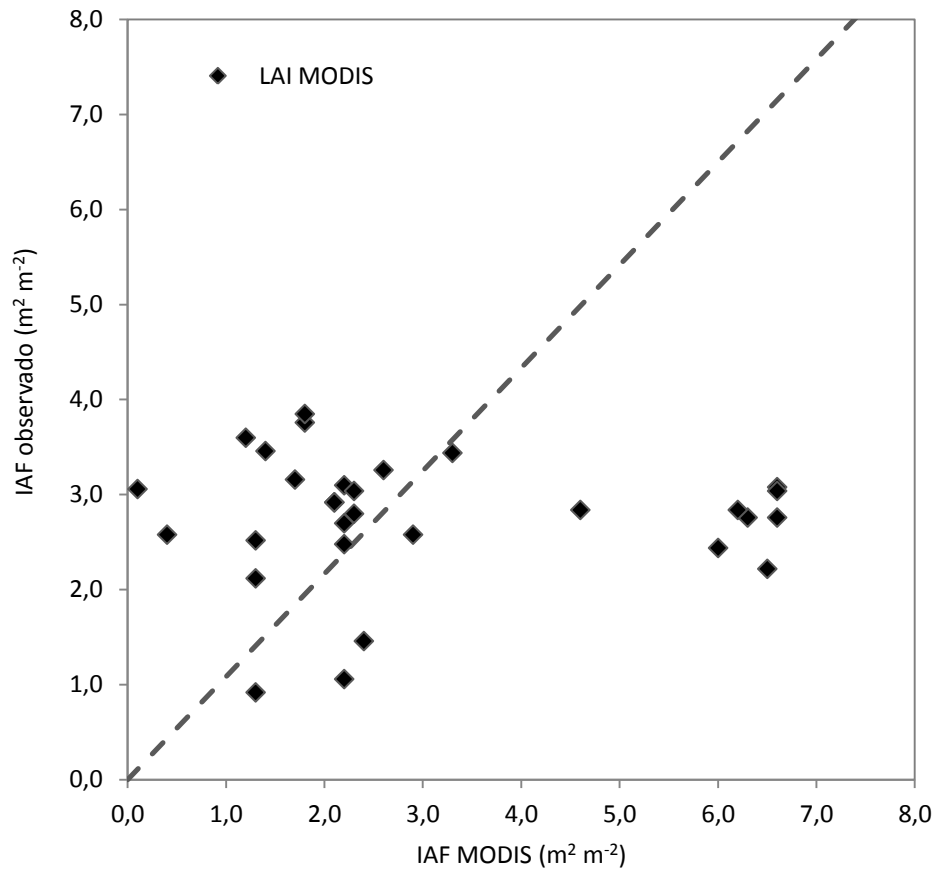


Figura 6.13 - IAF de referência comparado com o IAF das imagens MODIS

Como se observa na figura 6.13 não há qualquer correlação entre as duas variáveis ( $R = -0.00227$ ), pelo que estes produtos de baixa resolução (1km x 1km), não têm utilidade para estudos locais, com a paisagem estratificada e dispersa em diferentes coberturas do solo.

## 7. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

A investigação desenvolvida neste estudo mostrou que quando estabelecemos correlações entre o IAF e as variáveis dos povoamentos, as que melhor se correlacionam são a percentagem de cobertura do solo (GC),  $R=0,88$ ; o volume comercial (V),  $R=0,75$ ; a área basal (G),  $R=0,74$  e a biomassa aérea total ( $B_t$ ),  $R=0,76$ . Contudo, observam-se moderadas correlações com outras variáveis como o acréscimo médio anual (AMA),  $R=0,69$ ; o diâmetro médio das copas ( $d_{copa}$ ),  $R=0,46$ ; a área de copa,  $R=0,41$ ; a idade dominante ( $t_{dom}$ ),  $R=0,43$  ou a idade média ( $t$ ),  $R=0,37$ .

Quando analisamos as correlações entre o IAF e a informação espectral das imagens MODIS e ETM+ constata-se apenas algumas correlações, moderadas, como é o caso da Banda ETM+ do vermelho (L7 R),  $R=0,395$  e da Banda MODIS do Infravermelho próximo (MOD NIR),  $R=0,15$ . Contudo os Índices de Vegetação (IV), calculados com as bandas do ETM+: Simple ratio (L7 SR), NDVI, EVI e EVI2 apresentam correlações negativas, baixas a moderadas, fruto da correlação inexistente que se observou com a banda do infravermelho próximo (L7 NIR),  $R= -0,096$ . Os IV das imagens MODIS não apresentaram qualquer correlação, o que se explica pela baixa resolução destas imagens (250mx250m), que apresentam nos pixéis localizados em cada parcela de amostragem, para além da informação espectral desse povoamento das classes de cobertura de solo vizinhas. Embora estes resultados não surpreendam, seria de esperar que as correlações com as imagens ETM+ conduzissem a melhores resultados.

A correção das falhas existentes nas imagens originais (gap filling), sendo uma interpolação dos valores de pixéis vizinhos, para preencher os valores em falta, poderia explicar a baixa correlação encontrada, contudo, apenas 6 parcelas caíram em linhas de pixéis corrigidos, que mesmo não consideradas não melhoram os resultados. Desta forma, a baixa heterogeneidade dos povoamentos de pinheiro bravo, com idades entre os 23 e os 53 anos, poderá explicar as alterações pouco sensíveis no comportamento espectral dos povoamentos. Acompanhando os estudos de (Aranha, 1998), (Castro, 2004) e (Lopes, 2005), observa-se que as correlações apresentadas entre o IAF e as características espectrais, em particular os Índices de vegetação, em povoamentos de pinheiro bravo, são também moderadas.

As equações de regressão para cálculo do IAF estabelecidas apenas com as melhores variáveis (G, V, Bt) com base nas estatísticas do ajustamento mostram um bom desempenho.

De forma a disponibilizar um conjunto de equações para estimar a Área basal (G, m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>), o Volume (V, m<sup>3</sup> há<sup>-1</sup>) e a Biomassa total aérea (Bt, T ha<sup>-1</sup>), a partir apenas do IAF (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>), estabeleceram-se também equações com boa qualidade no ajustamento.

Dos modelos desenvolvidos e comparados com os ajustados por outros autores, Nemani and Running (1989), Aranha (1998), Porté *et al.* (2000) e (Lopes, 2005), o modelo com melhor desempenho nos dados é o de Porté *et al.* (2000) com um desvio padrão dos resíduos, Syx = 16%.

Em relação ao produto MOD15A2 que inclui o Índice de Área Foliar global (1km x 1km), os valores dos pixéis sobrepostos em cada parcela de amostragem, foram extraídos e comparados com as medições do IAF, em campo com o ceptómetro não se verificando qualquer correlação entre as duas variáveis (R=-0.00227), pelo que estes produtos de baixa resolução (1km x 1km), não têm utilidade para estudos locais, com a paisagem estratificada e dispersa em diferentes coberturas do solo.

Apesar das dificuldades encontradas, os resultados finais são satisfatórios, embora em trabalhos futuros será importante ajustar alguns aspetos como a escolha dos povoamentos mais heterogéneos em relação à idade. Será também útil avaliar imagens de alta resolução, como por exemplo do satélite GeoEye, Quickbird, Worldview, entre outros, havendo contudo inconveniente do seu preço de aquisição. Será também útil avaliar as imagens Landsat 8, que à data de realização do estudo ainda não estavam disponíveis.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aranha, J., An integrated geographical information system for the Vale do Alto Tâmega (GISVAT), Kingston University, PhD Thesis, England, 1998.
- Bolstad, P.V., Gower, S.T., 1990. Estimation of leaf area index in fourteen southern Wisconsin forest stands using a portable radiometer. *Tree physiology* 7, 115-124.
- Bréda, N.J.J., 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* 54, 2403-2417.
- Brenner, A.J., Cueto Romero, M., Garcia Haro, J., Gilabert, M.A., Incoll, L.D., Martinez Fernandez, J., Porter, E., Pugnaire, F.I., Younis, M.T., 1995. A comparison of direct and indirect methods for measuring leaf and surface areas of individual bushes. *Plant, Cell & Environment* 18, 1332-1340.
- Bruce, L., Mathur, A., Byrd, J.J., 2006. Denoising and Wavelet-Based Feature Extraction of MODIS Multi-Temporal Vegetation Signatures. *GIScience & Remote Sensing* 43, 67-77.
- Burrough, P.A., 1996. Principles of Geographical Information Systems for Land Ressources assesment. Oxford University Press, New York, 194 pp. edition, John Wiley & Sons, Inc, pp. 468.
- Bustillos, L.V., 2012. MODEL: Gap Fill for Landsat 7 images – A correction of SLC-off. ArcGis toolbox.
- Campbell, C.L., Madden, L.V., 1990. Introductions to plant disease epidemiology. New York: John Wiley, pp. .
- Castro, J.P.M., Aplicação da Detecção Remota em Inventário Florestal, University of Trás-os-Montes e Alto Douro, PhD Thesis, Vila Real, Portugal, 2004.
- Chason, J.W., Baldocchi, D.D., Huston, M.A., 1991. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology* 57, 107-128.
- Chen, J.M., Black, T.A., 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment* 15, 421-429.
- Chuvieco, E., 1990. Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones Rialp.
- Colditz, R.R., Gessner, U., Conrad, C., van Zyl, D., Malherbe, J., Nevvby, T., Landmann, T., Schmidt, M., Dech, S., 2007. Dynamics of MODIS Time Series for Ecological Applications in Southern Africa. Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images, 2007. MultiTemp 2007. International Workshop on the, pp. 1-6. Available online at,
- Eastman, J.R., 2006. Idrisi Andes. Guide to GIS and Image Processing. Clark Labs. Clark University, USA, pp. 328.
- ESRI, 2013. ArcGIS Desktop: Release 9.1. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Fonseca, A.D., Fernandes, J.C., 2004. Detecção Remota. Lidel- Lisboa, pp. 248.
- Gower, S.T., Kucharik, C.J., Norman, J.M., 1999. Direct and Indirect Estimation of Leaf Area Index, fAPAR, and Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 70, 29-51.
- INE, 2012. Censos 2011, Instituto Nacional de Estatística. Available online at: [http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos2011\\_apresentacao](http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos2011_apresentacao), (acesso: 22 de Abril de 2013).

- Jiang, Z., Huete, A.R., Didan, K., Miura, T., 2008. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment* 112, 3833-3845.
- Justice, C.O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J.T., Roy, D., Descloitres, J., Alleaume, S., Petitcolin, F., Kaufman, Y., 2002. The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment* 83, 244-262.
- Lang, A.R.G., 1991. Application of some of Cauchy's theorems to estimation of surface areas of leaves, needles and branches of plants, and light transmittance. *Agricultural and Forest Meteorology* 55, 191-212.
- Leblanc, S.G., Chen, J.M., 2001. A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 110, 125-139.
- Levy, E.B., Madden, E.A., 1933. The point method of pasture analysis. *New Zealand Journal of Agriculture* 46, 267-279.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W., 2004. *Remote Sensing and image Interpretation*, 5th ed. John Wiley and Sons Inc., New York, pp. 764.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W., 2005. *Geographic Information Systems and Science*, 2nd Edition ed. Wiley.
- Lopes, D., Estimating Net Primary Production in *Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster* Ecosystems in Portugal, Kingston University, PhD Thesis, England, 2005.
- LP DAAC - NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, 2001. MODIS. USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota. Available online at: <https://lpdaac.usgs.gov/>, (acesso: 15 de Abril de 2013).
- Marques, C.P., 1991. Evaluating site quality of even-aged maritime pine stands in northern Portugal using direct and indirect methods. *Forest Ecology and Management* 41, 193-204.
- Martens, S.N., Ustin, S.L., Rousseau, R.A., 1993. Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis. *Forest Ecology and Management* 61, 91-108.
- McLeod, S.D., Running, S.W., 1988. Comparing site quality indices and productivity in ponderosa pine stands of western Montana. *Canadian Journal of Forest Research* 18, 346-352.
- Melesse, A., Weng, Q., Thenkabail, P., Senay, G., 2007. Remote Sensing Sensors and Applications in Environmental Resources Mapping and Modelling. *Sensors* 7, 3209-3241.
- Myneni, R.B., Hoffman, S., Knyazikhin, Y., Privette, J.L., Glassy, J., Tian, Y., Wang, Y., Song, X., Zhang, Y., Smith, G.R., Lotsch, A., Friedl, M., Morisette, J.T., Votava, P., Nemani, R.R., Running, S.W., 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 83, 214-231.
- NASA, 2013a. The Landsat program. Available online at: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/history.html>, (acesso: 20 de Abril de 2013).
- NASA, 2013b. Landsat Data Continuity Mission (LDCM) Available online at: <http://ldcm.gsfc.nasa.gov/index.html>, (acesso: 21 de Abril de 2013).
- NASA, 2013c. MODIS. Specifications. National Aeronautics and Space Administration. Available online at: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>, (acesso: 16 de Abril de 2013).



- Nemani, R.R., Running, S.W., 1989. Testing a theoretical climate-soil-leaf area hydrologic equilibrium of forests using satellite data and ecosystem simulation. *Agriculture And Forest Meteorology* 44, 245-260
- NOAASIS, 2013. Advanced Very High Resolution Radiometer - AVHRR. Available online at: <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>, (acesso: 25 de Abril de 2013).
- Parresol, B.R., 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *J For Sci* 45, 573-593.
- Pereira, J.M., Tomé, M., Carreiras, J.M., Tomé, J.A., Pereira, J.S., David, J.S., Favião, A.M., 1997. Leaf area estimation from three allometrics in *Eucalyptus globulus* plantations. *Canadian Journal of Forest Research* 27, 166-173.
- Pierce, L.L., Running, S.W., 1988. Rapid Estimation of Coniferous Forest Leaf Area Index Using a Portable Integrating Radiometer. *Ecology* 69, 1762-1767.
- Pires, B., Gonçalves Ferreira, A., Sevinete Pinto, P., 2010. A (r)evolução dos SIG! Rumo ao futuro com o software da SuperMap. Available online at: [http://www.usig.pt/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=138&Itemid=63&lang=pt](http://www.usig.pt/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=138&Itemid=63&lang=pt), (acesso: 15 de Abril de 2013).
- Porté, A., Bosc, A., Champion, I., Loustau, D., 2000. Estimating the foliage area of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) branches and crowns with application to modelling the foliage area distribution in the crown. *Ann. For. Sci.* 57, 73-86.
- Prince, S., J. Small, 2003. Global Production Efficiency Model, 1997\_npp\_latlon, Department of Geography, University of Maryland, College Park, Maryland, 1997. Available online at: <http://glcf.umd.edu/data/glopem/>, (acesso: 15 de Abril de 2013).
- Ross, I.U., 1981. The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands: Includes index. Dr. W. Junk Publishers.
- Running, S.W., Peterson, D.L., Spanner, M.A., Teuber, K.B., 1986. Remote Sensing of Coniferous Forest Leaf Area. *Ecology* 67, 273-276.
- Salomonson, V.V., Toll, D.L., 1990. Execution phase (C/D) spectral band characteristics of the EOS Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS-N) facility instrument. *Advances in Space Reserach.* 2, pp. 231-236.
- Salomonson, V.V., Barker, J.L., 1992. EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: phase C/D status and comments on calibration and georeferencing approaches. In: Annual AASGuidance and Control Conference, 15., Keystone, CO, Feb. 8-12, 1992. Proceedings. Keystone: AAS. Paper AAS 92-004.
- Schulze, E.D., 1982. Plant Life Forms and Their Carbon, Water and Nutrient Relations, in: Lange, O.L., Nobel, P.S., Osmond, C.B., Ziegler, H. (eds.), *Physiological Plant Ecology II*, vol. 12 / B. Springer Berlin Heidelberg, pp. 615-676.
- Smith, W.K., Schoettle, A.W., Cui, M., 1991. Importance of the method of leaf area measurement to the interpretation of gas exchange of complex shoots. *Tree physiology* 8, 121-127.
- Soudani, K., Trautmann, J., Walter, J.-M., 2001. Comparaison de méthodes optiques pour estimer l'ouverture de la canopée et l'indice foliaire en forêt feuillue. Elsevier, Paris, France.
- Strahler, A., D. Muchoney, J. Borak, M. Friedl, S. Gopal, E. Lambin, and A. Moody, 1999. MODIS land cover product algorithm theoretical basis document (ATBD). Version 5, Center for Remote Sensing, Department of Geography. Available

- online at: [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod12.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod12.pdf), (acesso: 20 de Abril de 2013).
- Thorp, K.R., Tian, L.F., 2004. A Review on Remote Sensing of Weeds in Agriculture. *Precision Agriculture* 5, 477-508.
- Toutin, T., 2004. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing* 25, 1893-1924.
- Tucker, C.J., J.E. Pinzon, and M.E. Brown, 2004. Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS), NA94apr15b.n11-VIg, 2.0, Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland, 04/15/1994. Available online at: <http://glcf.umd.edu/data/gimms/>, (acesso: 15 de Abril de 2013).
- USGS, 2013a. SLC-off Data Information. U.S. Geological Survey (USGS) Earth Resources Observation Systems (EROS) Data Center (EDC). Available online at: [http://landsat.usgs.gov/products\\_slc\\_off\\_data\\_information.php](http://landsat.usgs.gov/products_slc_off_data_information.php) (acesso: 15 de Abril de 2013).
- USGS, 2013b. Filling the Gaps to use in Scientific Analysis. U.S. Geological Survey (USGS) Earth Resources Observation Systems (EROS) Data Center (EDC). Available online at: [http://landsat.usgs.gov/sci\\_an.php](http://landsat.usgs.gov/sci_an.php), (acesso: 15 de Abril de 2013).
- Viana, H., Lopes, D., Aranha, J., 2009. Predição de biomassa arbustiva lenhosa empregando dados de inventário e o índice de diferença normalizada extraído em imagens Landsat 5 TM. 37.
- Viana, H., Lopes, D., Aranha, J., 2011. Assessment of Forest Aboveground Biomass Stocks and Dynamics with Inventory Data, Remotely Sensed Imagery and Geostatistics, in: Shaikat, S.S. (ed.), *Progress in Biomass and Bioenergy Production*. InTech, pp. 107-130.
- Viana, H., Modelling and mapping aboveground biomass for energy usage and carbon storage assessment in mediterranean ecosystems, University of Trás-os-Montes e Alto Douro, PhD Thesis, Vila Real, Portugal, 2012a, pp. 428.
- Viana, H., 2012b. Equação de volume para o pinheiro bravo. Trabalho não publicado. Escola Superior Agrária. Instituto Politécnico de Viseu.
- VITO, 2013. SPOT-VEGETATION PROGRAMME. Available online at: <http://www.vgt.vito.be/>, (acesso: 25 de Abril de 2013).
- Wang, Q., Tenhunen, J., Dinh, N.Q., Reichstein, M., Vesala, T., Keronen, P., 2004. Similarities in ground- and satellite-based NDVI time series and their relationship to physiological activity of a Scots pine forest in Finland. *Remote Sensing of Environment* 93, 225-237.
- Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J., Granier, A., 2005. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment* 94, 244-255.
- Warren Wilson, J., 1965. Point quadrat analysis of foliage distribution for plants growing singly or in rows. *Australian Journal of Botany* 13, 405-409.
- Watson, D.J., 1947. Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops: I. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf Area between Species and Varieties, and within and between Years. *Annals of Botany* 11, 41-76.
- Whitford, K.R., Colquhoun, I.J., Lang, A.R.G., Harper, B.M., 1995. Measuring leaf area index in a sparse eucalypt forest: a comparison of estimates from direct

- measurement, hemispherical photography, sunlight transmittance and allometric regression. *Agricultural and Forest Meteorology* 74, 237-249.
- Zheng, G., Chen, J.M., Tian, Q.J., Ju, W.M., Xia, X.Q., 2007. Combining remote sensing imagery and forest age inventory for biomass mapping. *J Environ Manage* 85, 616-623.
- Zheng, G., Moskal, L.M., 2009. Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors* 9, 2719-2745.
- Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R., Mencuccini, M., 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe, *Silva Fennica Monographs* 4. Finnish Society of Forest Science, p. 63.